

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

(CREADA POR LEY N° 25265)



FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL - HUANCAMELICA

TESIS

**"INFLUENCIA DEL AGREGADO GRUESO DE LA CANTERA
DEL RÍO ICHU EN EL CONCRETO PERMEABLE PARA
PAVIMENTOS DE BAJO TRÁNSITO - F'C 175KG/CM²"**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:
TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES**

**DISCIPLINA:
INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:

BACH. PAUCAR CURASMA, YESICA

BACH. MORALES DE LA CRUZ, FRANCIS WILLMOOR

**HUANCAMELICA - PERÚ
2018**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el Auditorium de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, a los 14 días del mes de mayo del año 2018, a horas 5:00 p.m, se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los siguientes: **M.Sc. Ivan Arturo AYALA BIZARRO (PRESIDENTE)**, **Arq. Abdón Dante OLIVERA QUINTANILLA (SECRETARIO)**, **Ing. Carlos GASPAS PACO (VOCAL)**, designados con Resolución de Consejo de Facultad N° 133-2017-FCI-UNH de fecha 20 de abril del 2017 y ratificados con Resolución de Decano N° 041-2018-FCI-UNH de fecha 09 de mayo del 2018, a fin de proceder con la evaluación y calificación de la sustentación del informe final de tesis titulado: "INFLUENCIA DEL AGREGADO GRUESO DE LA CANTERA DEL RÍO ICHU EN EL CONCRETO PERMEABLE PARA PAVIMENTOS DE BAJO TRÁNSITO-F'C 175KG/CM2", presentado por los Bachilleres **Yesica PAUCAR CURASMA y Franciss Willmoor MORALES DE LA CRUZ**, para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**; en presencia del **Ing. Omar Caballero Sánchez**, Asesor del presente trabajo de tesis. Finalizado la evaluación a horas 6:30 p.m.; se invitó al público presente y los sustentantes abandonar el recinto. Luego de una amplia deliberación por parte de los Jurados, se llegó al siguiente resultado:

Yesica PAUCAR CURASMA

APROBADO



POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO



Franciss Willmoor MORALES DE LA CRUZ

APROBADO



POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO

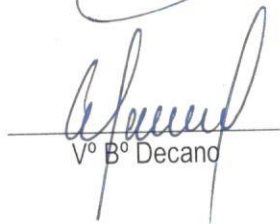


En señal de conformidad, firmamos a continuación:


Presidente


Secretario


Vocal


Vº Bº Decano



ASESOR:

ING. CABALLERO SÁNCHEZ, OMAR

DEDICATORIA

A Dios: por ser mi guía incondicional en el camino que elegí y por llenarme de gracia y bendiciones.

A mi madre: Amacia Curasma, quién con su consejo, esfuerzo y dedicación supo guiarme para culminar una etapa de mi formación profesional.

A mis hermanos: Ronald, Maribel, Saúl, Nélda, Herminio y Cristhian; quienes con su apoyo, consejos y motivación me ayudaron a conseguir mis objetivos y a no claudicar ante una adversidad.

A todos mis maestros por impartir conocimientos, enseñanzas, experiencias y sobre todo el compromiso de cada uno de ellos hacia nosotros los estudiantes.

A mi compañero de tesis: Franciss, por la motivación, entusiasmo y el compromiso de emprender juntos el logro de un grado profesional.

A mis amigos y compañeros de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por compartir sus experiencias y etapas vividas durante nuestra formación académica en la Universidad.

Yesica Paucar Curasma.

A Dios: ante todo, por guiarme hacia un camino correcto y derramar sus bendiciones.

A mi padre: William Morales, por ser la persona más importante en mi vida, quien a pesar de las dificultades nunca se rindió y estuvo a mi lado apoyándome y guiándome para culminar con la carrera profesional.

A mi Madre: Lina De la cruz que en paz descanse, por cuidarme desde el más allá y orar por todos sus hijos.

A mis hermanas: Gandia y Fátima, quienes estuvieron en todo momento apoyándome y motivándome en mi vida profesional y personal.

A mi compañera de tesis: Yesica, por compartir momentos de estudio, consejos y apoyo culminando con el objetivo de obtener el grado profesional.

A los Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil por la educación brindada en nuestra formación universitaria y a todo mis amigos y compañeros de salón por compartir conocimientos y experiencias vividas en la universidad.

Franciss Willmoor Morales De La Cruz.

AGRADECIMIENTO

A nuestra institución, Universidad Nacional de Huancavelica y a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil; por la oportunidad brindada durante los años de formación profesional y así escalar un peldaño más en el campo del conocimiento.

A Dios Todopoderoso por permitimos culminar nuestros estudios universitarios, ya que su sabiduría, misericordia y protección estuvieron siempre presentes a lo largo de nuestras vidas.

A nuestros jurados, Ing. Iván Ayala Bizarro, Ing. Carlos Gaspar Paco y Arq. Dante Olivera Quintanilla; por la atención, información, consejos e inculcación de esfuerzo y respeto brindada.

A nuestro asesor de Tesis Ing. Omar Caballero Sánchez, por el apoyo incesante en la elaboración y ejecución de este proyecto.

Al laboratorio de Ensayo de Materiales y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, así como también al técnico Alfredo Mendoza Soto y practicantes Miguel y Robinson, por su constante apoyo y colaboración en ejecución de este proyecto experimental.

A nuestros padres, hermanos, amigos y compañeros por compartir sus conocimientos, experiencia y anécdotas con nosotros. Y a todos los demás colaboradores que de forma directa e indirecta ayudaron en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
CAPÍTULO I: PROBLEMA.....	17
1.1. Planteamiento de Problema	17
1.2. Formulación del Problema.....	18
1.2.1. Problema General.....	18
1.2.2. Problemas Específicos	18
1.3. Objetivo	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos	19
1.4. Justificación	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	20
2.1. Antecedentes.....	20
2.1.1. A Nivel Internacional:.....	20
2.1.2. A Nivel Nacional:	23
2.1.3. A Nivel Local.....	24
2.2. Bases Teóricas.....	24
2.2.1. Concreto Permeable.....	24
2.2.2. Pavimentos permeables	43
2.2.3. Análisis Hidrológico – Hidráulico en Pavimentos Permeables	48
2.3. Hipótesis.....	87
2.3.1. Hipótesis General	87
2.3.2. Hipótesis específicas	87
2.4. Definición de Términos	87
2.5. Identificación de Variables	91
2.6. Definición Operativa de Variables e Indicadores	91
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	93
3.1. Ámbito de estudio	93
3.2. Tipo de Investigación.....	93

3.3.	Nivel de Investigación.....	93
3.4.	Método de Investigación.....	93
3.5.	Diseño de Investigación.....	94
3.6.	Población, Muestra, Muestreo	95
3.6.1.	Población.....	95
3.6.2.	Muestra.....	95
3.6.3.	Muestreo.....	95
3.7.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	95
3.7.1.	Técnicas	95
3.7.2.	Instrumentos	96
3.8.	Procedimiento de recolección de datos	97
3.9.	Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos	97
CAPÍTULO IV: RESULTADOS		99
4.1.	Presentación de Resultados.....	99
4.1.2.	Elaboración de probetas cilíndricas de concreto permeable.....	119
4.1.3.	Ensayo de Resistencia a Compresión de Probetas	147
4.1.4.	Ensayo de Coeficiente de Permeabilidad:	152
4.2.	Discusión	158
4.2.1.	Análisis estadístico	158
4.2.3.	Análisis de Costo	172
CONCLUSIONES.....		175
RECOMENDACIONES.....		177
Referencia Bibliográfica.....		179
ANEXOS.....		181

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades físicas de los agregados para su aceptabilidad	41
Tabla 2: Precipitación máxima en 24 horas	52
Tabla 3: Precipitación máxima en 24 horas valores máximos anuales	53
Tabla 4: Parámetros de Distribución Log – Pearson tipo III con momentos ordinarios	54
Tabla 5: Parámetros de Distribución Log – Pearson tipo III con momentos lineales.....	54
Tabla 6: Resultados de la distribución Log – Pearson tipo III	54
Tabla 7: Resultados Final de la distribución de Log Pearson tipo III.....	55
Tabla 8: Parámetros de Distribución Gumbel con momentos ordinarios	55
Tabla 9: Parámetros de Distribución Log – Pearson tipo III con momentos lineales.....	55
Tabla 10: Resultados de la distribución de Gumbel	56
Tabla 11: Resultados Final de la distribución de Gumbel	56
Tabla 12: Resultados de la distribución Log – Pearson tipo III	57
Tabla 13: Resultados de la distribución Gumbel	58
Tabla 14: Precipitación Máxima en 24 horas para periodos de Retorno (T)	59
Tabla 15: Intensidades máximas (mm/h)	61
Tabla 16: Intensidades máximas de lluvia de diseño (mm/h).....	62
Tabla 17: Intensidades máximas de lluvia de diseño (mm/h).....	63
Tabla 18: Valores de Curva IDF Método IILA – SENAMHI	65
Tabla 19: Actividades típicas de mantenimiento para el concreto permeable (ACI 522, 2006)	83
Tabla 20: Clasificación general del agregado según tamaño.....	88
Tabla 21: Clasificación de los Aditivos	89
Tabla 22: Variables de Estudio	92
Tabla 23: Coordenadas UTM de la cantera "Callqui Chico".....	100
Tabla 24: Descripción del proceso de elaboración el ensayo de contenido de humedad	102
Tabla 25: Contenido de humedad del agregado fino	103
Tabla 26: Contenido de humedad del agregado grueso	103
Tabla 27: Descripción del proceso de elaboración el ensayo de peso específico y absorción del agregado fino.	104
Tabla 28: Datos del ensayo de peso específico.....	106
Tabla 29: Resultados del peso específico y absorción del agregado fino.	106
Tabla 30: Descripción del proceso de elaboración el ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso.	107
Tabla 31: Datos del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso.....	108
Tabla 32: Resultados del peso específico y absorción del agregado grueso.....	109
Tabla 33: Descripción del proceso de elaboración del ensayo de peso unitario del agregado fino y grueso.	110
Tabla 34: Peso unitario suelto del agregado fino.	111
Tabla 35: Peso unitario compactado del agregado fino.	111

Tabla 36: Peso unitario suelto del agregado grueso	111
Tabla 37: Peso unitario compactado del agregado grueso	112
Tabla 38: Porcentajes de vacío del agregado compactado.	112
Tabla 39: Descripción del proceso de elaboración del ensayo granulométrico del agregado fino y grueso.	112
Tabla 40: Granulometría del agregado grueso y fino.	114
Tabla 41: Descripción del proceso de elaboración del ensayo de Abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaño menores de 37.5 mm (1 ½").	117
Tabla 42: Datos de abrasión de los agregados gruesos.	118
Tabla 43: Resumen de los ensayos realizados.....	118
Tabla 44: Rangos Típicos de las proporciones de materiales en el concreto permeable	121
Tabla 45: Resultados de los diferentes ensayos de laboratorio practicados al agregado grueso y fino (Resumen)	127
Tabla 46: Obtención de la cantidad de agregado grueso.....	130
Tabla 47: Corrección por incorporación de Agregado fino.	130
Tabla 48: Volumen de materiales del diseño de mezcla	130
Tabla 49: Corrección por humedad, Absorción y Aporte.....	131
Tabla 50: Valores de Diseño corregido por Humedad	131
Tabla 51: Proporciones de Diseño de Mezcla del Concreto Permeable por Peso	131
Tabla 52: Número de Probetas para Ensayo a Resistencia a Compresión.....	132
Tabla 53: Cantidad de mezcla por tanda con porcentaje de desperdicio de 15%.	132
Tabla 54: Peso Unitario en Estado Fresco Ø 3/8"	135
Tabla 55: Peso Unitario en Estado Fresco Ø 1/2"	136
Tabla 56: Peso Unitario en Estado Fresco Ø 3/4"	136
Tabla 57: Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco Ø 3/8"	136
Tabla 58: Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco Ø 1/2"	136
Tabla 59: Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco Ø 1/2"	137
Tabla 60: Descripción del proceso de elaboración del ensayo de Densidad y Contenido de Vacíos del Concreto Permeable en Estado Endurecido.	144
Tabla 61: Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido Ø 3/8"	146
Tabla 62: Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido Ø 1/2"	146
Tabla 63: Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido Ø 3/4"	147
Tabla 64: Rotura de probetas para diferentes granulometrías.	148
Tabla 65: Resultados de la resistencia a la compresión del Concreto Permeable	150
Tabla 66: Número de muestras a utilizar en el ensayo de permeabilidad	152
Tabla 67: Coeficiente de Permeabilidad del agregado grueso de Ø= 3/8", 1/2" y 3/4.:	156
Tabla 68: Costo del agregado fino y grueso en la ciudad de Huancavelica	172
Tabla 69: Análisis de Costos Unitarios para una base de Concreto Convencional f'c = 140 kg/cm2	173
Tabla 70: Análisis de Costos Unitarios para una base de Concreto Permeable f'c = 140 kg/cm2	173

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Procedimiento de mezclado del concreto permeable.....	133
Fotografía 2: Equipos utilizados para el ensayo de peso unitario del concreto permeable.	133
Fotografía 3: Pesado del material de $\varnothing=1/2$ más la briqueta utilizada.	134
Fotografía 4: Pesado del material de $\varnothing=3/4$ más la briqueta utilizada.	134
Fotografía 5: Pesado del material de $\varnothing=3/8$ más la briqueta utilizada.	135
Fotografía 6: Equipos utilizados para el ensayo de cono invertido.....	137
Fotografía 7: Procedimiento de ensayo de revenimiento o slump en el concreto permeable de $\varnothing=3/8$ " (asentamiento 0 cm)	138
Fotografía 8: Ensayo del cono invertido en el concreto permeable de $\varnothing=3/8$ "	138
Fotografía 9: Procedimiento de ensayo de revenimiento o slump en el concreto permeable de $\varnothing=1/2$ " (asentamiento 0 cm)	139
Fotografía 10: Ensayo del cono invertido en el concreto permeable de $\varnothing=1/2$ "	139
Fotografía 11: Procedimiento de ensayo de revenimiento o slump en el concreto permeable de $\varnothing=3/4$ " (asentamiento 0 cm)	139
Fotografía 12: Ensayo del cono invertido en el concreto permeable de $\varnothing=3/4$ "	140
Fotografía 13: Moldes habilitados para el vaciado	140
Fotografía 14: Muestra el mezclado del concreto permeable.....	140
Fotografía 15: Muestra el compactado del concreto permeable.....	141
Fotografía 16: Vaciado del moldes $\varnothing 3/8$ "	141
Fotografía 17: Vaciado del moldes $\varnothing 1/2$ "	141
Fotografía 18: Vaciado del moldes $\varnothing 3/4$ "	142
Fotografía 19: Desencofrado del moldes $\varnothing 3/8$ "	142
Fotografía 20: Desencofrado del moldes $\varnothing 1/2$ "	143
Fotografía 21: Desencofrado del moldes $\varnothing 3/4$ "	143
Fotografía 22: Curado de especímenes	143
Fotografía 23: Muestra del tarrajeo de la superficie de los especímenes (mortero)	147
Fotografía 24: Muestra el ensayo a la compresión simple de una briqueta con la superficie tarrajada.	148
Fotografía 25: Captura del registro de resistencia a compresión de un espécimen de $3/8$ ".	150
Fotografía 26: Captura del registro de resistencia a compresión de un espécimen de $1/2$ ".	150
Fotografía 27: Captura de registro de resistencia a compresión.....	150
Fotografía 28: Procedimiento de la elaboración del permeámetro	154
Fotografía 29: Equipos de ensayo de permeabilidad.	154
Fotografía 30: Procedimiento del uso del permeámetro para los diferentes especímenes de $\varnothing= 3/8$ ", $1/2$ " y $3/4$ ".	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Filtración del agua en el concreto permeable con un 22.5% de vacíos	25
Figura 2 Principales aplicaciones del concreto permeable	27
Figura 3 Precipitación sobre el pavimento permeable	28
Figura 4 Estructura interna del concreto permeable.	31
Figura 6: Estructura interna del concreto permeable (Flores & Pacompia (2015)).....	¡Error!
Marcador no definido.	
Figura 7: Resistencia a la compresión a los 28 días vs Peso unitario (Flores & Pacompia (2015))	32
Figura 8: Relación entre Resistencia a la compresión a los 28 días y la relación agua-cemento (Flores & Pacompia (2015))	32
Figura 9: Relación entre el contenido de vacíos y la resistencia a la flexión para el concreto permeable (Flores & Pacompia (2015))	34
Figura 10: Relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión para el concreto permeable (Flores & Pacompia (2015))	34
Figura 11 Relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión para el concreto permeable (Flores & Pacompia , 2015).....	35
Figura 12: Muestra los Husos granulométricos para poder realizar los diseños de mezclas (ASTM C33).....	41
Figura 13: Clasificación de pavimentos permeable (Quispe, 2015).....	45
Figura 14: Módulo de 1m2 utilizados en la simulación del escurrimiento superficial (Quispe, 2015):.....	46
Figura 15: Escurrimiento superficial observado en las diversas superficies ensayadas. (Flores & Pacompia, 2015)	46
Figura 16: Esquema conceptual de flujos de un pavimento permeable. (Quispe, 2015) ..	47
Figura 17: Conceptualización de un pavimento permeable. (Quispe, 2015)	47
Figura 18: Precipitación máxima en 24 Horas (1990-2014).....	53
Figura 19: Curva de intensidad, duración y frecuencia	66
Figura 20: Estructura de un pavimento de concreto permeable (ACI 522, 2006).	68
Figura 21: Colocación del concreto permeable por medio de un camión mezclador con descarga por atrás (Torres, 2009)	72
Figura 22: Rastrillado del concreto permeable a una elevación aproximada.....	73
Figura 23: El encofrado deberá tener el espesor del pavimento, además de ser lo suficientemente resistentes y estables (http://www.pervious.com/images/unh.JPG).....	74
Figura 24: Encofrado de madera sujeta a base de clavijas	74
Figura 25: Enrasado del concreto permeable mediante el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo "A" (www.perviousconcrete.com).....	75
Figura 26: Compactación del concreto permeable mediante el uso de un rodillo (Flores & Pacompia, 2015)	75
Figura 27: Rodillo pequeño usado para compactar un área pavimentada pequeña (http://www.perviousconcrete.com/images/build07/cert_pervious_roller.gif)	77

Figura 28: Construcción de una junta mediante la adaptación de una hoja en el rodillo de compacta.....	78
Figura 29: Material de polietileno utilizado para cubrir la superficie expuesta del concreto permeable.....	80
Figura 30: Máquina autopropulsada de limpieza con sistema presión-aspiración.....	83
Figura 31 Etapas del proceso de ejecución de la presente investigación.....	99
Figura 32: Vista satelital de la zona de extracción del agregado grueso, proveniente de la cantera del río Ichu denominado "Callqui Chico".....	101
Figura 33: Curvas granulométricas, que representan la curva natural del agregado grueso y fino de la cantera del río Ichu.....	116
Figura 34: Relación entre el contenido de aire y la tasa de filtración, (ACI 522R-10, ACI 211.3R-02).....	123
Figura 35 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados No. 8 (ACI522R-10, 2010)	124
Figura 36: Contenido de vacíos vs Filtración requerida (Adaptado de: ACI 522R-10, 2010)	128
Figura 37: Contenido de pasta vs Contenido de Vacíos (Adaptado de: ACI 522E-10, 2010)	129
Figura 38: Tipo de falla de cilindros de prueba estándar.....	148
Figura 39: Comparación de la resistencia a compresión de los diferentes tamaños de agregado.....	151
Figura 40: Diagrama comparativo del Coeficiente de Permeabilidad del Agregado Grueso de $\varnothing=3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$	157
Figura 41: Histograma del resultado obtenido en la resistencia a compresión del concreto permeable de $\varnothing=3/8"$ (Base de datos SPSS).....	159
Figura 42: Histograma del resultado obtenido en la resistencia a compresión del concreto permeable $\varnothing=1/2"$ (Base de datos SPSS).....	159
Figura 43: Histograma del resultado obtenido en la resistencia a compresión del concreto permeable (Base de datos SPSS).....	160
Figura 44: Diagrama de cajas del logro obtenido de resistencia a compresión del concreto permeable para los $\varnothing=3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$ (Base de datos SPSS).....	161
Figura 45: Cuadro estadístico dónde se verifica que existen varias modas, dónde se mostrará el menor de los valores (Base de datos SPSS).....	161
Figura 46: Cuadro estadístico inferencial y de particular ANOVA de un factor (sig=5%) (Base de datos SPSS).....	162
Figura 47: Prueba de Post Hoc para validar la Resistencia a la compresión del concreto permeable (Base de datos SPSS).....	163
Figura 48: Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos, dónde se usó el tamaño muestral de la media armónica = 8.000.....	164
Figura 49: Histograma del resultado obtenido de los resultados del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable de $\varnothing=3/8"$ (Base de datos SPSS).....	165
Figura 50: Histograma del resultado obtenido de los resultados del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable de $\varnothing=1/2"$ (Base de datos SPSS).....	166

Figura 51: Histograma del resultado obtenido de los resultados del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable de $\phi=3/4"$ (Base de datos SPSS).	166
Figura 52: Diagrama de cajas del logro obtenido de los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable (Base de datos SPSS).	168
Figura 53: Cuadro estadístico dónde se verifica que existen varias modas, dónde se mostrará el menor de los valores (Base de datos SPSS).	168
Figura 54: Figura 44: Cuadro estadístico inferencial y de particular ANOVA de un factor (sig=5%) (Base de datos SPSS).	169
Figura 55: Prueba de Post Hoc para validar el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable (Base de datos SPSS).	170
Figura 56: Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos, dónde se usó el tamaño muestral de la media armónica = 5.000	170



RESUMEN

La presente investigación titulada “Influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - $f'c$ 175kg/cm²”, se realizó en el laboratorio de Ensayo de Materiales y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica de la Universidad Nacional de Huancavelica; el cual centra su estudio en el efecto que tiene el huso granulométrico del agregado grueso en las propiedades mecánicas del concreto permeable, tales como su resistencia a la compresión y permeabilidad (parámetros de relevancia en este tipo de concreto), aplicado para pavimentos de bajo tránsito $f'c=175$ kg/cm² en la ciudad de Huancavelica, permitiendo el control del escurrimiento superficial y la evacuación de la precipitación pluvial.

Para el diseño de mezcla del concreto permeable de una resistencia de 175 kg/cm², fueron utilizados agregados gruesos de tamaño $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{1}{2}$ ” y $\frac{3}{8}$ ”, gradación que representa la granulometría natural del agregado grueso proveniente de la cantera del río Ichu (con un Tamaño máximo de 1”) y que a su vez es recomendada por el ACI 522R-10 “Reporte en concreto permeable”, para la obtención de mayores resistencias a la compresión y permeabilidad adecuada del concreto permeable; analizado esto en 8 probetas cilíndricas para cada tamaño de agregado grueso haciendo un total de 24, a los cuales se realizó el ensayo de resistencia a la compresión ($f'c$) a los 28 días y 15 probetas cilíndricas para el ensayo de permeabilidad.

De la comparación de las características de los concretos permeables derivados del diseño de mezcla, se determinó que el concreto permeable elaborado con el agregado grueso de tamaño $\emptyset = \frac{3}{4}$ ” es la más idónea, permitiéndonos alcanzar una resistencia a la compresión de 145.21 kg/cm² y coeficiente de permeabilidad de 1.208 cm/s, valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos. Se determinó también el contenido de vacíos en su estado fresco y endurecido. El diseño de mezcla se ha desarrollado conforme los reportes del ACI 522R-10 “Reporte en concreto permeable y ACI 211.3R-02 “Guía para la selección de proporciones para concretos de bajo Slump”, normadas por el ACI.

Palabras clave: Concreto permeable, diseño de mezclas, resistencia a la compresión, coeficiente de permeabilidad, pavimentos permeables.

Abstract

The present investigation entitled "Influence of the thick anchorage of the quarry of the Ichu river in pervious concrete for low traffic pavements - f_c 175kg / cm²", was carried out in the Materials and Concrete Testing Laboratory of the Professional School of Engineering Civil - Huancavelica of the National University of Huancavelica; which focuses in its study on the effect of the granulometric spindle of coarse aggregate on the mechanical properties of pervious concrete, stories such as its resistance to compression and permeability (parameters of relevance in this type of concrete), applied to pavements of under transit f_c = 175 kg / cm² in the city of Huancavelica, allowing the control of surface runoff and the evacuation of rainfall.

For the design of a permeable concrete mix with a strength of 175 kg / cm², thick aggregates of size $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ " and $\frac{3}{8}$ " were used, grading that represents the natural granulometry of the coarse aggregate coming from the Ichu quarry (with a maximum size of 1 ") and which in turn is recommended by the ACI 522R-10 "Report in concrete permeable ", to obtain greater resistance to compression and adequate permeability of permeable concrete; analyzed this in 8 cylindrical test tubes for each size of coarse aggregate making a total of 24, to which the compression resistance test (f_c) was performed at 28 days and 15 cylindrical test pieces for the permeability test.

From the comparison of the characteristics of the permeable concrete derived from the mixing design, it was determined that the pervious concrete made with the thick aggregate of size $\emptyset = \frac{3}{4}$ " is the most suitable, allowing us to reach a compressive strength of 145.21 kg / cm² and coefficient of permeability of 1,208 cm / s, values that are within the established ranges. The content of voids in its fresh and hardened state was also determined. The mixing design has been developed according to the reports of the ACI 522R-10 "Report in concrete permeable and ACI 211.3R-02" Guide for the selection of proportions for concrete of low Slump ", regulated by the ACI.

Keywords: Permeable concrete, mix design, compression resistance, permeability coefficient, permeable pavements.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la escasez de materiales, así como el alto costo de estos y su transporte dieron paso a la utilización de un concreto permeable sin finos que disminuye los contenidos de cemento (pasta) en las mezclas y que sirve de alternativa de solución ante los daños que ocasiona el ser humano a los mantos acuíferos y a los suelos permitiendo transformar la escorrentía superficial en infiltración, por lo tanto, el concreto poroso se puede establecer como una de las medidas innovadoras ante los problemas de inundación suscitadas bajo la retención de la escorrentía superficial sin afectar el desarrollo urbano.

El concreto permeable es un material con revenimiento cero, compuesto de cemento portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, que se caracteriza por su alta porosidad que permite el paso del agua a través de su estructura. Esta característica se debe a su alto contenido de vacíos interconectados en el orden de 15 % a 35% dependiendo de los materiales y de su aplicación. A su vez el comité nos brinda otras características que definen el concreto permeable, como su capacidad de infiltración que varía entre 81 a 731 L/min/m² y su resistencia de 28.55 kg/cm² a 285.51 kg/cm².

La posibilidad de utilizar este material en Huancavelica motivó esta investigación, cuyo objetivo principal consiste en determinar la influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito – $f'c$ 175kg/cm², para lo cual el estudio comprendió la utilización de tres diferentes tamaños de agregado grueso ($3/4"$, $1/2"$ y $3/8"$) para la mezcla de concreto permeable a una dosificación de $f'c=175\text{kg/cm}^2$, con la finalidad de verificar el comportamiento del concreto permeable y obtener el diseño de "idóneo", descrito esto como la obtención de las mejores características, como mayores valores de resistencia a la compresión y permeabilidad adecuada,

Con este estudio que contempla la utilización del concreto permeable para pavimentos de baja tránsito, se pretende conseguir recargar el acuífero, preservar los recursos hídricos, reducir el escurrimiento del agua pluvial o eliminarlo, remover algunos contaminantes, mejorando la calidad del agua. Además, esta práctica reduce o elimina en gran medida la necesidad de áreas de retención costosas y el costo de alcantarillas para la conducción del agua.

CAPÍTULO I: PROBLEMA

1.1. Planteamiento de Problema

El crecimiento acelerado de las urbes asociado al proceso de impermeabilización (entendido esto como el uso de pavimentos convencionales en estructuras de áreas urbanas), incrementan la preocupación en la reducción de los agentes contaminantes del agua y del medio ambiente, provocados por el efecto de erosión que se genera a partir del aumento en los volúmenes de escorrentía superficial lo que ocasiona inundaciones urbanas, colmatación y desborde de los sistemas de drenaje (buzones, cunetas y cajas de drenaje) que a su vez disminuyen la capacidad de recarga natural de los mantos acuíferos.

Perú ha venido experimentando un crecimiento urbano acelerado y año tras año se producen cambios climáticos que genera fenómenos naturales provocados por las estaciones lluviosas con un incremento inusual, afectando en su mayoría a las ciudades de Lima, Ica, Arequipa, Junín entre otras; produciéndose importantes inundaciones en zonas urbanas, ante esto las autoridades locales y regionales no realizan una gestión adecuada para atenuar y contrarrestar los daños provocados por estos fenómenos.

Huancavelica, al ubicarse geográficamente a 3660 msnm, de clima fuerte por ser frío y de altitud, vive actualmente problemas de este tipo, presentando precipitaciones pluviales en abundancia según lo establece el SENAMHI (2015) en los datos del “Registro histórico de precipitaciones pluviales máximas” cuya estación comprende los años 1990 al 2014. Generalmente este fenómeno sucede durante el período de lluvias (diciembre - marzo), afectando negativamente el desarrollo urbano, la circulación vehicular y peatonal afectando considerablemente a puntos críticos situados en los barrios de San Cristóbal, Santa Ana, Yananaco y el distrito de

Ascensión. Existe un acontecimiento suscitado en el año 2011 con el desborde del río Ichu, provocando inundaciones de las viviendas aledañas, acumulación de agua contaminada sobre el pavimento, afectando esto a la salud de la población y a su vez al paso vehicular y peatonal en el barrio de San Cristóbal y Santa Ana.

Ante la necesidad de resolver los problemas de inundaciones urbanas y percibir que no existen pruebas ni estudio del concreto permeable con los agregados de la zona; se promovió el desarrollo de esta investigación, con el fin de conocer el comportamiento del concreto permeable con materiales Huancavelicanos en específico el agregado grueso de la cantera del río Ichu y poder determinar cómo es que estas influyen en las propiedades del concreto permeable descritas como el alcance de una mayor resistencia y permeabilidad adecuada para aplicarlos en pavimentos de bajo tránsito de $f'c$ 175 kg/cm² garantizando un menor costo y funcionalidad adecuada.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1. Problema General

¿Cómo influirá el agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - $f'c$ 175kg/cm²?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu influirá en la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm²?
- ¿De qué manera la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu influirá en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm²?

1.3. Objetivo

1.3.1. Objetivo General

Determinar la influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - $f'c$ 175 kg/cm².

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu en la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².
- Determinar la influencia de la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².

1.4. Justificación

Actualmente en Huancavelica, no se han implementado de manera efectiva el uso del Concreto Permeable como solución a los problemas acarreados por la evacuación de aguas pluviales y el uso masivo de pavimento convencional (superficies impermeables), donde solo se realizaron temas de investigación dirigidas por la Universidad Nacional de Huancavelica que difieren del tema de investigación. Ante ello se vio beneficioso aportar información y conocimientos de los estudios actuales que vienen realizándose en diferentes países tales como México, Colombia y Chile; quienes realizan estudios de pre y postgrado para lograr la inclusión de este tipo de concreto en el desarrollo de su infraestructura vial.

Según Castro (2011, p.18), "La implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible ayudan a contrarrestar los efectos negativos de la urbanización en el ciclo del proyecto, por medio de ellos se mejora la calidad del agua de lluvia en el sitio donde se produce"

De lo vertido anteriormente, la posibilidad de utilizar este material en la ciudad de Huancavelica (zona urbana) justifica esta investigación, el cual pretende determinar que si el agregado grueso del río Ichu, cumpliera con los requisitos establecidos en la norma ACI 522R-10; podría aplicarse como un elemento constituyente del Concreto Permeable como parte de la solución a los problemas de inundaciones de las zonas urbanizadas por presentar vías impermeables. Esta es la razón de ser de esta Investigación, por una parte, encontrar y unificar métodos actuales de diseño que se adapten a las características propias de nuestro país y a su vez que sirva como modelo para aplicarlo en investigaciones para climas apropiados similares al del estudio.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Los antecedentes de la presente investigación se obtuvieron revisando las diversas fuentes bibliográficas que a continuación se mencionan:

2.1.1. A Nivel Internacional:

Lian & Zhuge (2010) realizaron una investigación denominada "*Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation*" donde sostienen que el pavimento permeable debido a su alta porosidad y permeabilidad son considerados como una alternativa a los pavimentos duros impermeables tradicionales para el control de las aguas pluviales de manera económica y amistosa, tras la ejecución de la investigación mencionada se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El uso de arenas de cantera aumentará la resistencia a la compresión del hormigón poroso, lo cual es mejor que el uso de una gruesa gradación de agregados de 9,5 mm a 2,36 mm. (Pág. 2670)
- El contenido de agua es uno de los factores fundamentales para la resistencia a la compresión. El control de la proporción de agua es esencial para producir la pasta de cemento fresca con una buena trabajabilidad y no obstruir todos los poros. Con los agregados fijos y aditivos, la proporción óptima de agua a cemento resulta ser 0,32, esto podría producir la resistencia a la compresión de 40 MPa después de 28 días y permeabilidad al agua por encima de 2 mm / s. Cuando el requisito de resistencia estructural no es muy alto o los posibles problemas de obstrucción son particularmente Afectado por el pavimento de hormigón permeable durante su largo tiempo de servicio, se podría utilizar una relación agua / cemento más alto de 0,36. (Pág. 2670)

Kamali, Delkash, & Tajrishy (2016) en su investigación *“Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff”*, señalan lo siguiente:

La construcción de pavimentos permeables en aceras de áreas urbanas es una alternativa de bajo impacto para controlar el volumen de escorrentía de las aguas pluviales y, en consecuencia, a disminuir los contaminantes en las masas de aguas receptoras. Los autores en mención obtuvieron que el rendimiento del pavimento permeable depende en gran medida de las condiciones locales, incluyendo la distribución del tamaño de partícula, las cargas de sedimentos y la forma de importar sedimentos al pavimento permeable. Esto significa que cada región debe tener experimentos específicos para evaluar los resultados del pavimento permeable. (Pág. 52)

Kim, Gaddafi, & Yoshitake (2016) tras la realización del trabajo denominado *“Permeable concrete mixed with various admixtures”* llegan a la conclusión:

- La presencia de cenizas volantes disminuyó la resistencia a la compresión del hormigón permeable en relación con la categoría de ensayo sin cenizas volantes. Los especímenes mezclados con las fibras mostraron una resistencia mejorada y su configuración geométrica afectó el grado de aumento de la resistencia. Los especímenes incluyendo las virutas del neumático demostraron una resistencia disminuida debido a su naturaleza suavizante elástica y desintegración prematura de los aglutinantes cementosos. (Pág. 18)
- La inclusión de las fibras mejoró la tasa de infiltración del hormigón permeable y las fibras trenzadas crearon más poros que los planos. El efecto de la ceniza volante sobre la infiltración dependía de la interacción con otros constituyentes. Las virutas del neumático tendieron a obstruir los poros y disminuir la infiltración. (Pág. 18)

Fernández & Navas (2008) en su tesis: *“Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad”*, desarrollan su investigación en el análisis del efecto que tienen, sobre 19 mezclas de concreto permeable, la relación agua/cemento, la relación agregado

grueso/cemento y el tipo de agregado grueso utilizado (procedencia y tamaño máximo). Los resultados obtenidos permitieron observar tendencias de comportamiento entre las distintas propiedades y la resistencia y permeabilidad del material. (Pág. 40); llegando así a las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos en este estudio indican que el concreto permeable es un material cuya resistencia y permeabilidad dependen de la influencia de ciertas variables. Por lo general, las variables que afectan de forma positiva la resistencia del material, lo hacen de forma negativa con la permeabilidad. Para el rango de propiedades utilizado en este estudio, la permeabilidad no presentó una disminución que impida el uso del material como parte de sistemas de manejo de la escorrentía superficial en aplicaciones de tránsito liviano (estacionamientos, ciclovías, aceras etc.).

Pérez (2009) centra su investigación denominada *“Estudio experimental del concreto permeable con agregados Andesíticos”* en la elaboración de mezclas de concreto permeable con agregados Andesíticos, diseñados para un 15% a 20% de vacíos, así como la realización del estudio experimental lo que permitirá evaluar si estas cumplen con las propiedades mecánicas y de permeabilidad utilizado para pavimentos de bajo tránsito y otras aplicaciones; concluyendo lo siguiente:

- Los resultados de los estudios realizados a las mezclas de concreto permeables diseñadas con 15% y 20% de vacíos elaboradas con agregados andesíticos, permiten concluir que si cumplen con las propiedades mecánicas y de permeabilidad adecuadas para su utilización en pavimentos con tránsito ligero u otras aplicaciones.
- La mezcla de concreto permeable más resistente se obtuvo utilizando una razón a/c de 0.35, utilizando agregado de 3/4", una dosis de cemento de 350 kg/m³, adicionando un 10% de arena y un porcentaje de vacíos de 15%. Esta dosificación permite obtener resistencias compresión en promedio cercanas a 215 kg/cm² y resistencias a flexión en promedio

cercanas a 46 kg/cm². Aunque las mezclas de concreto permeable con agregado de 3/8" presentan menores resistencias, estas resultan con una textura más estética que la obtenida con agregado de 3/4" debido al tamaño de agregado.

Torres (2010) realizó la investigación "*Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción*", cuyo diseño de investigación fue de tipo descriptivo, obteniéndose las siguientes conclusiones:

- Debido al agotamiento de los mantos acuíferos, tal vez el mayor problema al cual se están enfrentando nuestras autoridades en varias ciudades de la República Mexicana y en otros países del mundo, por lo que el uso de un pavimento permeable ayudaría en mucho a mantener el medio ambiente en el que vivimos, ya que permite la recuperación de agua de lluvia a los mantos acuíferos que son las fuentes naturales de suministro de agua de las ciudades.
- Por ejemplo, en su caso, la ciudad de México y de Guadalajara obtiene el 75% del agua potable de los mantos acuíferos. Si se lograran recargar los mantos acuíferos mediante el uso de pavimentos permeables, se podrían reducir los costos de extracción de agua, que en nuestros días suelen ser muy elevados, debido a que, en algunos lugares, el agua se tiene que extraer de pozos muy profundos.
- Este trabajo trata de plasmar los puntos principales relacionados con el concreto permeable, tal vez parezca muy somera la información, pero se realizó una búsqueda exhaustiva para encontrar esta información, ya que no se ha realizado tanta investigación de este tema, debido a que no fue un material con el éxito que se esperaba.

Así mismo este antecedente coincide con la variable dependiente de la presente investigación.

2.1.2. A Nivel Nacional:

Flores & Pacompia (2015) en su tesis "*Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras plástico para pavimentos de f'c 175kg/cm²,*

en la ciudad de Puno” centran su estudio en los efectos que se producen al incorporar tiras de propileno para la obtención de un diseño de mezcla de concreto permeable óptimo, para lo cual consideraron dos tipos de diseño de mezcla (de acuerdo al tamaño de agregado grueso empleado en su diseño), en busca de las mejores características, como mayores valores de resistencia a la compresión y permeabilidades adecuadas. (Pág. 14), dónde llegaron a las siguiente conclusión:

- La incorporación de tiras de polipropileno (3mm x 30mm) en el diseño de mezcla de un concreto permeable diseñado para pavimentos $f_c=175$ kg/cm² en la ciudad de Puno, mejora parcialmente las propiedades del mismo, específicamente su resistencia a la compresión. Se ha determinado que la adición de dichas tiras en dos porcentajes (de los tres estudiados), incrementa la resistencia a la compresión del concreto permeable. Y respecto a las otras propiedades estudiadas, como el contenido de vacíos y coeficiente de permeabilidad, se ha determinado que la adición de tiras de propileno produce una variación ligera en sus magnitudes, presentando una tendencia a la reducción de los mismos conforme se incrementa el porcentaje de adición de tiras.
- La resistencia a la compresión desarrollada a los 28 días por el Concreto Permeable elaborado con agregado grueso de Huso N°57, es menor en un 26.13% comparada con la desarrollada con el uso N°8.

2.1.3. A Nivel Local

En la región de Huancavelica no se encontró ningún antecedente similar al presente proyecto.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Concreto Permeable

2.2.1.1. Definición:

De acuerdo a la norma ACI 522R-10 (2010), el concreto permeable o concreto poroso, es definido como un concreto con revenimiento cero con alto grado de porosidad, y con una relación de vacíos alta; consiste de

cemento portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino y agua. La combinación de estos ingredientes producirá un material endurecido con poros conectados, que varía de tamaño de 2 a 8 mm, lo cual permite que el agua pase fácilmente a través de él. El contenido de vacíos puede variar de 15% a 35% y se pueden alcanzar resistencias a la compresión entre 28 a 280 kg/cm². La capacidad de drenaje de un pavimento de concreto permeable variará con el tamaño del agregado y la densidad de la mezcla, pero generalmente varía en el rango de 81 a 730 L/min/m² ó 0.14 a 1.22 cm/s. En la figura 2, se observa cómo el agua pasa fácilmente a través de dos testigos de concreto permeable elaborados con los diseños de mezcla considerados.



Figura 1: Filtración del agua en el concreto permeable con un 22.5% de vacíos

Brundell (2006) mencionó: "Es un concreto permeable y ecológico, porque permite la filtración del agua al subsuelo, lo que minimiza el escurrimiento del agua de lluvia que provoca las inundaciones y encharcamientos"

Según Fernández & Navas (2008, p.40) define: "El concreto permeable es un material que puede ser usado en pavimentos de bajo volumen, calles de urbanizaciones o parqueos, entre otros. Es una mezcla de cemento, agua y agregado grueso"

Así como también Torres (2010, p.5) definen al concreto permeable como un concreto especial que se caracteriza por su alta porosidad que permite el paso del agua a través de su estructura. Esta característica se debe a su alto

contenido de vacíos interconectados en el orden de 15% a 35% dependiendo de los materiales y de su aplicación.

2.2.1.2. Aplicaciones:

El concreto permeable es utilizado principalmente para pavimentar superficies de uso vehicular y peatonal y donde se requiera tener áreas permeables permitiendo así que el agua de lluvia infiltre libremente al subsuelo, como resultado obtenemos la reducción o eliminación de escorrentía superficial proveniente de las aguas pluviales. Entre la amplia gama de aplicaciones para el concreto permeable se tienen:

- Vialidades de tráfico ligero.
- Áreas de estacionamiento.
- Andadores, banquetas y ciclovías, patios y jardines.
- Capas rígidas de drenaje bajo áreas exteriores.
- Aplicaciones en muros estructurales en donde se requieren características de ligero o de mejor aislamiento térmico, o ambos.
- Pavimentos, muros y pisos en donde se desean mejores características de absorción acústica.
- Capas de base para las calles urbanas, carreteras municipales, caminos partícula aeropuertos.
- Zonas de lavado de autos.
- Lechos de sedimentos en plantas para el tratamiento de aguas negras.
- Estructuras de playas y muros marinos (escolleras, rompeolas, etc.).
- Terraplenes de puentes.
- Capas de superficie de losas deportivas.

La norma ACI 522R-10 (2010) "Reporte en concreto permeable" recomienda la colocación del concreto permeable en áreas de alta permeabilidad, suelo natural con una gran conductividad hidráulica. Además, las áreas no deberán tener pendientes mayores al 5%. En general, en todas estas aplicaciones se utiliza concreto permeable sin refuerzo, por el alto riesgo de corrosión del acero de refuerzo debido a la estructura porosa de este material.

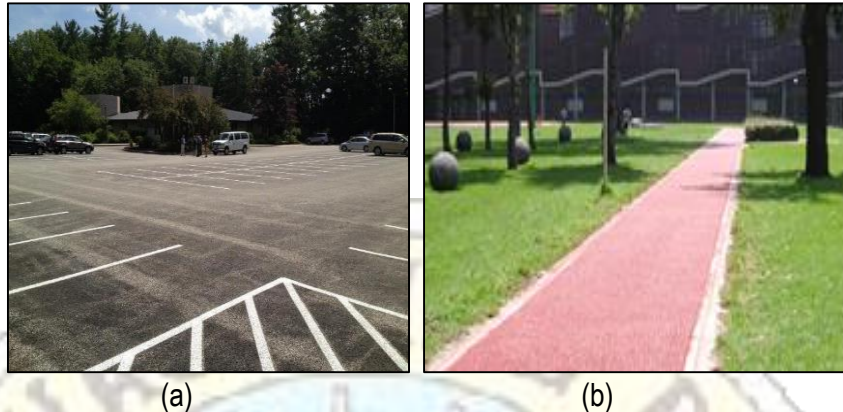


Figura 2 Principales aplicaciones del concreto permeable

- a) Estacionamientos ((<http://ecotelhado.com.co/tag/pavimento-ecologico/>).)
 b) Andadores ((<http://hidrocreto.com/aplicaciones.php?idioma=es>))

2.2.1.3. Ventajas y desventajas

2.2.1.3.1. Ventajas

Según Sañudo (2014, p.32), las diversas aplicaciones mencionadas, la utilización de concreto permeable en pisos y pavimentos conlleva grades ventajas, siendo sus beneficios no solo económicos y estructurales, sino también ecológicos; como, por ejemplo:

- Por su función permeable, no interrumpe el ciclo hidrológico del agua en las ciudades, permitiendo la filtración de agua pluvial en los mantos acuíferos.
- Permiten el control de la contaminación de las aguas pluviales, impidiendo que éstas se deriven hacia el sistema de desagüe y se mezclen con las aguas residuales.
- Son filtrados los agentes contaminantes que pueden contaminar las aguas subterráneas y dañar ecosistemas.
- Control de escurrimiento de agua pluvial.
- Por ser un material que posee del 15% al 35% de vacíos, no genera islas de calor como el asfalto y concreto hidráulico.
- Evita encharcamiento y la saturación en los drenajes en época de lluvia.
- Por ser un material poroso es autodrenante y autoventilado.
- Disminuye los gradientes térmicos (reflexión mínima de la luz)
- Aumenta la calidad de servicios vehiculares y peatonales para usuarios, durante la lluvia.

- Su peso volumétrico es un 20% a un 25% menor, como consecuencia de la baja retracción por el porcentaje de vacíos contenidos en comparación con un concreto convencional.

El concreto permeable permite el manejo de las aguas pluviales al mismo tiempo que provee una infraestructura durable necesaria para el desarrollo. En la figura 3 se muestra cómo actúa una precipitación sobre la superficie de concreto permeable. Los pavimentos permeables pueden generar un importante beneficio, debido a la contribución de estos a mantener las condiciones naturales de una zona. De ser así, el control de las inundaciones se consigue con mantener la red de drenaje natural.



Figura 3 Precipitación sobre el pavimento permeable
(www.imcyc.com/revistacyt/jun11/arttecnologia.htm)

2.2.1.3.2. Desventajas

Según Sañudo (2014, p.33), la utilización del concreto permeable en pisos y pavimentos posee algunas desventajas, como son:

- Pérdida de su permeabilidad con el paso del tiempo, al saturarse los espacios vacíos con material fino (material contaminante). Por lo que es imprescindible el mantenimiento del mismo, a base de agua y presión.
- Posee una menor resistencia al desgaste que el concreto convencional, por lo que solo debe aplicarse en zonas de tráfico ligero.

El comité ACI 522R-06 (2010) recomienda:

El éxito de la utilización del concreto permeable en pisos y pavimentos ha sido variado en algunas áreas los sistemas de pavimento de concreto

permeable se han aplicado exitosamente, mientras que en otros no. En general las fallas de estos sistemas son atribuibles a la inexperiencia en la construcción de este tipo de pavimento, a una compactación del suelo más alta de la especificada y al diseño inapropiado según el lugar de aplicaciones de este material. En aras de que un pavimento permeable funcione exitosamente.

- Verificar la permeabilidad de los suelos, la tasa de filtración debe ser mínimamente de 13mm/hr con una capa de suelo de 1.2 m a más. Facilitando así la infiltración del agua y la recarga de las aguas freáticas, aunque no filtran toda el agua pluvial de las tormentas excepcionalmente grandes.
- Evitar el escurrimiento de agua y el ingreso de maquinaria pesada en las áreas de concreto permeable. El pavimento de concreto permeable no debe ser puesto en servicio hasta que toda la tierra removida con pendiente hacia el pavimento permeable sea estabilizada por vegetación. A fin de evitar la colmatación del sistema son esenciales los controles estrictos de la erosión y de sedimentación durante las actividades de construcción.
- Que el tránsito vehicular durante la etapa de construcción sea dirigido hacia afuera del área de pavimento permeable para evitar la compactación de las capas del suelo subyacente y la pérdida de la capacidad de filtración.

2.2.1.4. Propiedades del Concreto Permeable

Las propiedades del concreto permeable dependen de sus materiales, diseño de mezclas y proceso constructivo, generalmente de su contenido de material cementante (c), la relación agua-cemento (a/c), el nivel de compactación, la gradación del agregado y su calidad.

2.2.1.4.1. Propiedades en estado fresco

a) Peso Unitario

El peso unitario (peso volumétrico, densidad o masa unitaria) del concreto permeable en estado fresco en general varía entre el 70% y 85% de una mezcla fresca de concreto convencional, oscilando entre 1600 a 2000 kg/m³, dependiendo del porcentaje de vacíos de diseño del sismo.

b) Revenimiento (slump)

El revenimiento o asentamiento generalmente es usado para medir la consistencia de una mezcla de concreto fresco. Cuanto mayor sea este, implica que más húmeda es la mezcla, el procedimiento de la realización de este ensayo está descrito en la norma ASTM C143. Sin embargo, la mezcla del concreto permeable se caracteriza por ser de “cero slump” y al ser medido generalmente se obtienen valores de 0 a 1 cm.

c) Contenido de vacíos (porosidad)

El contenido de vacíos se calcula como porcentaje de aire y está directamente relacionado con el peso unitario de una mezcla dada de concreto permeable. El contenido de vacíos es altamente dependiente de varios factores: gradación del agregado, el contenido de material cementante, la relación agua-cemento (a/c) y el nivel de compactación.

La energía de compactación aplicada en la elaboración de un concreto permeable influye de sobremanera en el porcentaje de vacíos y por consiguiente en su peso volumétrico. En una serie de pruebas de laboratorio (Meininger, 1988), para una sola mezcla de concreto permeable, compactado con ocho niveles diferentes de esfuerzo, los valores de peso de unidades producidas, variaban desde 1680-1920 kg/m³.

Conforme la magnitud de la porosidad incrementa, la resistencia a la compresión que desarrolla un concreto permeable disminuye, en cambio si la porosidad disminuye la resistencia aumenta. Estudios han demostrado que el porcentaje de vacíos para concretos permeables se encuentran entre 14% a 31%. Utilizándose en general un porcentaje de

vacíos entre 15% a 25% para obtener resistencias mayores de 140 kg/cm². En la figura 4 se muestra la estructura interna del concreto permeable.

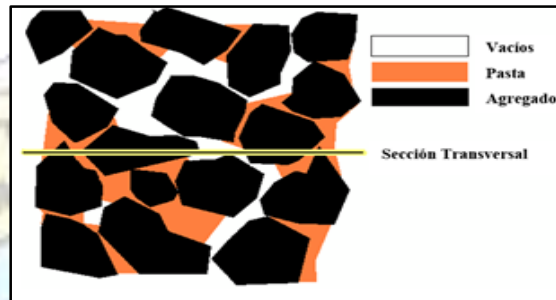


Figura 4 Estructura interna del concreto permeable.

2.2.1.4.2. Propiedades en estado endurecido

a) Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión puede ser definida como máxima media de resistencia que ofrece un espécimen de concreto a una carga axial.

Esta se determina de acuerdo a lo estipulado en la norma ASTM C39

La resistencia a la compresión que desarrolla el concreto permeable está fuertemente afectada por el esfuerzo de compactación durante la colocación. En la figura 5, ACI2113R (1988) muestra la relación entre la resistencia a la compresión del concreto permeable y el contenido de vacíos. La figura 5 se basa en los resultados de una serie de ensayos de laboratorio, considerando dos tamaños de agregado grueso para un esfuerzo de compactación.

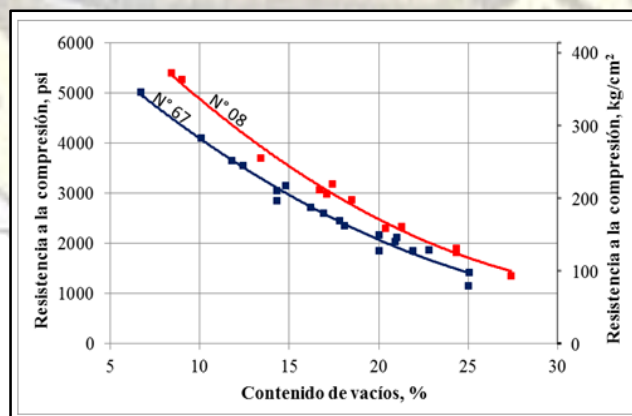


Figura 5 Estructura interna del concreto permeable (ACI2113R, 1988)

La figura 6, muestra una relación entre la resistencia a la compresión del concreto permeable y el peso de la unidad. La figura se basa en otra serie de prueba de laboratorio dónde fue utilizado un tamaño de agregado grueso y un esfuerzo de compactación, variándose la relación de agua – cemento (a/c)

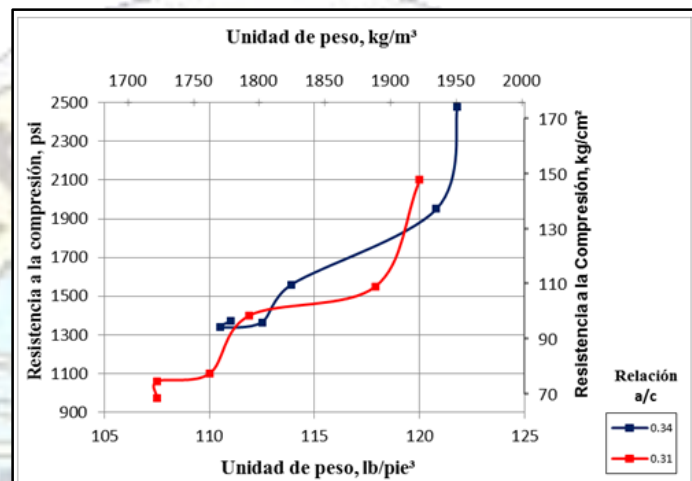


Figura 6: Resistencia a la compresión a los 28 días vs Peso unitario (ACI2113R, 1988)

La figura 7, muestra que resistencias a la compresión relativamente altas del concreto permeable son posibles, con relaciones agua-cemento (a/c) aproximadamente de 0.4, y con gradaciones de agregado grueso de menor tamaño, como es el caso del Huso N° 8.

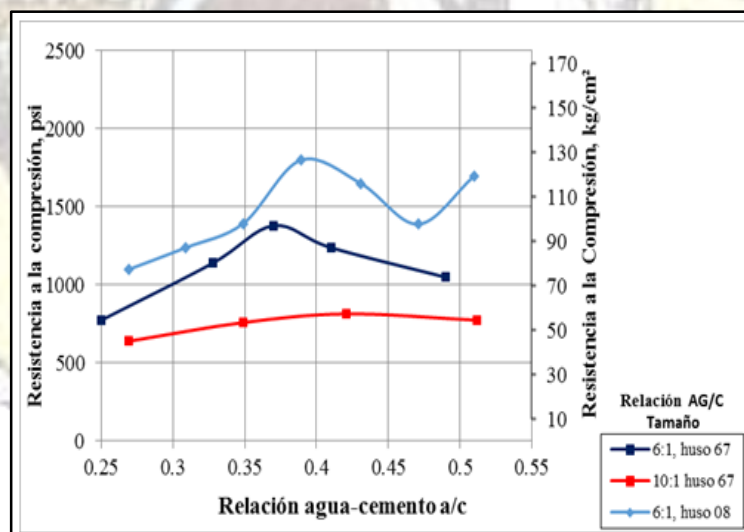


Figura 7: Relación entre Resistencia a la compresión a los 28 días y la relación agua-cemento (ACI2113R, 1988)

Los valores típicos de resistencias a la compresión, según antecedentes se encuentran alrededor de 175 kg/cm². La resistencia a la compresión en campo estará supeditada a la calidad de los materiales empleados, técnicas de colocación y condiciones ambientales, de manera similar a cualquier tipo de concreto. Para mejorar la resistencia a la compresión desarrollada por el concreto permeable, se deben mejorar: La resistencia de la pasta y la cohesión entre el agregado y la pasta. Esto es posible con la utilización de los agregados gruesos con menor tamaño y/ usando aditivos o materiales adicionales en la mezcla.

b) Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una de las características técnicas más importantes que presenta el concreto permeable, debido a que su resistencia a la flexión es mejor que la del concreto hidráulico convencional, comúnmente es 30% de la resistencia a la compresión, es decir, relativamente más alta que en el concreto convencional (Pérez, 2009). La resistencia a la compresión la cual es más fácil de medir que la resistencia a la flexión, se puede usar como un índice de la resistencia a la flexión, una vez que la relación empírica entre ambas ha sido establecida para los materiales y los tamaños de los elementos involucrados.

En la figura 8, muestran la relación entre la resistencia a la flexión del concreto permeable y el contenido de vacíos basado en muestras de vigas ensayadas en la misma serie de pruebas de laboratorio descritos para la figura 9. Aunque estos resultados se basan en un número limitado de muestras, comparando los datos de la figura 10, se puede observar que existe una relación entre la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto permeable.

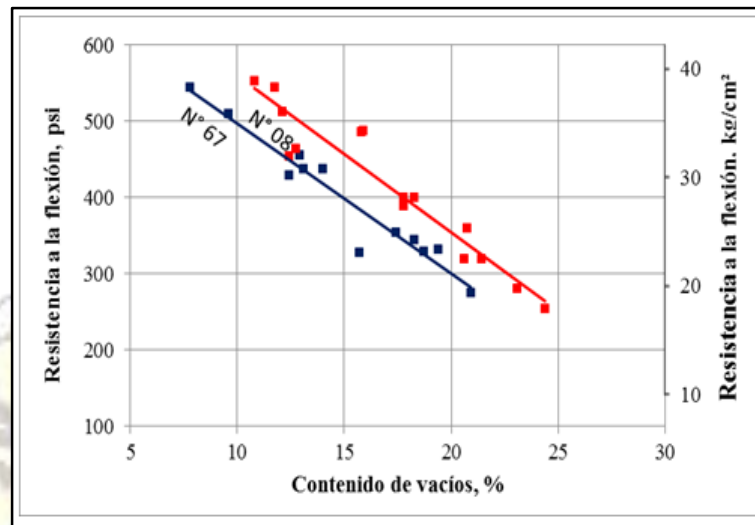


Figura 8: Relación entre el contenido de vacíos y la resistencia a la flexión para el concreto permeable (ACI2113R, 1988)

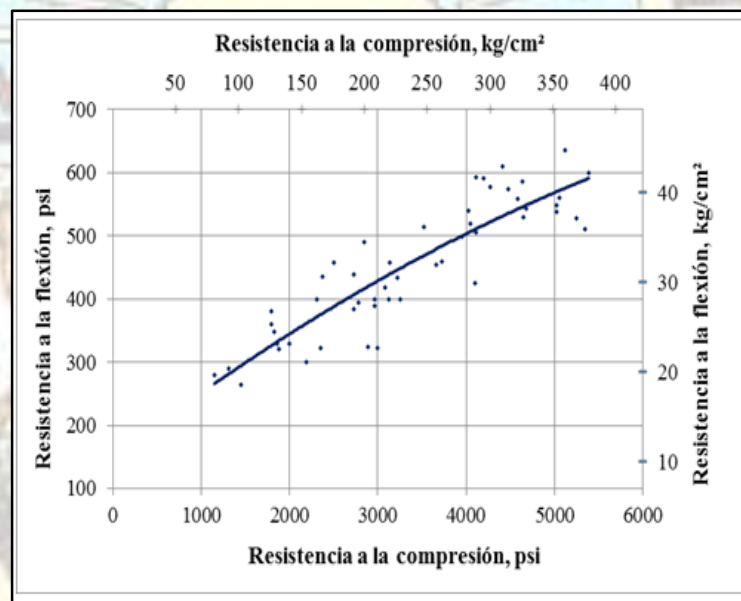


Figura 9: Relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión para el concreto permeable (ACI2113R, 1988)

La resistencia a la flexión en concretos permeables generalmente se encuentra en el rango de 10.5 kg/cm² y 40 kg/cm². Existen varios factores que influyen en la resistencia a la flexión, principalmente el grado de compactación, porosidad y la relación agregado/cemento (AG/C)

c) Permeabilidad

Una de las características más importantes del concreto permeable es su capacidad para filtrar agua a través de su matriz y su magnitud es medida por la tasa de filtración del concreto permeable está directamente relacionada con el contenido de vacíos. Debido a que las tasas de filtración aumentan a medida que el contenido de vacíos aumenta, y, en consecuencia, la resistencia a la compresión disminuye, el reto en la dosificación de mezcla de concreto permeable es lograr un equilibrio entre una tasa de percolación y una resistencia a la compresión aceptables.

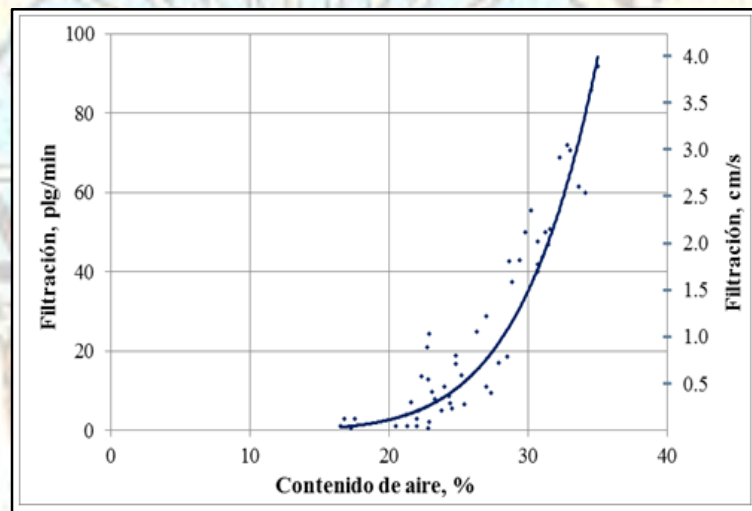


Figura 10 Relación entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión para el concreto permeable (ACI2113R, 1988)

Flores & Pacompia (2015), manifiestan que la capacidad de filtración del concreto permeable normalmente se encuentra en el rango de 0.14 a 1.22 cm/s. Para que se pueda asegurar el flujo del agua se recomienda al menos el 15% del contenido de vacíos.

d) Absorción acústica

De acuerdo a Felipe & Castañeda (2014)

Debido a la presencia de un gran volumen de poros interconectados de tamaños considerables en el material, el concreto permeable es altamente eficaz en la absorción acústica. El material puede ser empleado como un medio para reducir el ruido generado por interacción neumático – pavimento en pavimentos de concreto. La reducción del ruido se produce

debido a la combinación de la menor generación de este y a una mayor absorción del sonido. Los pavimentos permeables alteran la generación de ruido, minimizando el bombeo del aire entre el neumático y la superficie del pavimento. Además, los poros absorben el sonido a través de la fricción interna entre el movimiento de las moléculas de aire y las paredes de los poros. El coeficiente de absorción “ α ” es una medida de la capacidad de un material para absorber el sonido. Un material con un coeficiente de absorción de 1.0 indica un material puramente absorbente, mientras que un material con un coeficiente de absorción de 0 indica que el material es puramente reflectante. El concreto convencional, por ejemplo, tiene típicamente un coeficiente de absorción de 0.03 a 0.05. De acuerdo a norma técnica ACI 522R-10 (2010), el concreto permeable tiene típicamente un intervalo de absorción de 0.1 (para mezclas con mal desempeño) a casi 1,0 (para mezclas con volumen óptimo de poros). El coeficiente de absorción depende de la frecuencia de las ondas sonoras que inciden, y, por lo tanto, es importante seleccionar un espesor de concreto permeable adecuado a fin de minimizar sonidos de frecuencia deseada.

e) Durabilidad

La durabilidad del concreto permeable se refiere a la vida útil bajo las condiciones ambientales dadas. Los efectos físicos que influyen negativamente en la durabilidad del concreto incluyen la exposición a temperaturas extremas y los productos químicos, tales como sulfatos y ácidos. No se han realizado investigaciones sobre la resistencia de concreto permeable al ataque agresivo por los sulfatos o agua ácida; la durabilidad del concreto permeable bajo condiciones de congelación – descongelación, tampoco está bien documentada. (ACI 522R-10, 2010)

f) Resistencia a la congelación y deshielo

Se desea que el concreto permeable empleado en pavimentos cumpla con su vida útil y necesite poco mantenimiento. La durabilidad que presente el concreto permeable debería permitirle resistir las condiciones

y solicitaciones tomadas en cuenta al momento de diseñarlos. La influencia de los ciclos de hielo y deshielo mientras el concreto esté saturado, es principalmente el agente más destructivo.

Cuándo el agua se congela, se expande en aproximadamente un 9%. El crecimiento de cristales de hielo expandidos desplaza el agua. Si los microporos en la pasta están saturados o casi saturados durante el proceso de congelación, entonces la presión hidrostática se acumula cuando la congelación progresa, Castro (2011)

Las pruebas en condiciones de congelación y descongelación indican poca durabilidad si toda la estructura de vacíos del concreto permeable se encuentra llena con agua. Ciclos de congelación lento (un ciclo por día * ASTM C 666), permiten que el agua presente en el concreto permeable drene, mejorando su durabilidad del mismo. Se debe tener precaución, cuando se utiliza el concreto permeable en condiciones en las que su estructura esté saturada completamente antes de que pueda producirse una helada. Las pruebas indican que la incorporación de aire en la pasta de cemento puede mejorar la durabilidad del concreto permeable ante la congelación y descongelación. ACI 522R-10 (2010)

Para que el concreto permeable mejore su resistencia a los procesos de hielo y deshielo el ACI 522R-10 (2010) recomienda:

- Utilizar espesores de capa de 20 a 60 cm en bases granulares sin finos, por debajo del concreto permeable.
- El concreto permeable que está parcialmente saturado debería tener suficientes huecos para el desplazamiento del agua, obteniendo así una resistencia a la congelación y deshielo.
- Garantizar el rápido drenado del concreto permeable, evitando la saturación.

g) Resistencia a los sulfatos

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto permeable o convencional que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (sulfato de calcio, sulfato de sodio

y sulfato de magnesio) pueden atacar un concreto pues éstos reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del concreto (pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia). El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma en primer lugar en la superficie del cemento, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado (Lian & Zhuge, 2010).

Por presentar una estructura abierta, el concreto permeable es más susceptible al ataque sobre una gran área. La utilización de concreto permeable en áreas donde existan alto contenido de sulfatos y agua contaminada puede ser posible siempre y cuando se encuentre aislado estos.

La colocación del concreto permeable sobre una base de 15 cm. Con tamaño máximo de agregados de 25 mm proporciona una base para el pavimento, almacenamiento de las aguas de lluvia, y aislamiento para el concreto permeable.

h) Resistencia a la abrasión

Los pisos, pavimentos y estructuras hidráulicas son expuestos a abrasión o al desgaste, por lo que en estas aplicaciones el concreto permeable necesita tener alta resistencia a abrasión. Resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión está relacionada directamente con la resistencia a la compresión del concreto. Un concreto con mayor resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que el concreto con menor resistencia a la compresión. (Flores & Pacompia, 2015)

Debido a que el concreto permeable la textura de la superficie es más áspera y presenta una estructura abierta; la abrasión y desintegración de las partidas de agregados puede ser un problema (Pérez, 2009).

Este tipo de agregado y el acabado realizado en la superficie del concreto permeable tienen gran influencia. Los agregados duros presentan mayor resistencia a la abrasión que los agregados blandos y una superficie con una terminación alisada presenta mejor comportamiento que otra que cuyo acabado es irregular. En general en los pavimentos de concreto permeable que han sido puestos en servicio, a las pocas semanas, estos tendrán menor cantidad de agregados sobre una superficie, debido a que estas partículas son desprendidas de la superficie y desalojadas por el tráfico. Después de pocas semanas, la desintegración de la superficie disminuye considerablemente permaneciendo la superficie del pavimento más estable. Una compactación y técnicas de curado adecuadas pueden reducir la ocurrencia de la desintegración de la superficie. (Pérez, 2009).

2.2.1.5. Componentes del Concreto Permeable

Los materiales que intervienen en la fabricación de concreto permeable no difieren de los utilizados para un concreto convencional, con la salvedad de que la utilización de agregado fino está limitada casi en su totalidad.

2.2.1.5.1. Materiales cementantes

Cemento Portland

De acuerdo a lo establecido en (ACI 522R-10, 2010), el cemento Portland que cumple con los requerimientos de las normas ASTM C150, C595, o C1157, es usado como el aglomerante principal. Pudiéndose usar materiales suplementarios como la ceniza volante, el cemento de escoria y el humo de sílice, los cuales deben satisfacer los requisitos de las normas ASTM C618, C989 y C1240.

Una mayor dosis de cemento generará un concreto más resistente, pero demasiado cemento disminuirá el porcentaje de vacíos interconectados en el concreto, perdiendo este su capacidad de infiltración. Es recomendable

utilizar una cantidad que fluctúe entre los 270 a 415 kg/m³, según requisitos de resistencia y permeabilidad. (Torres, 2010)

2.2.1.5.2. Los agregados

La norma ASTM D448 (2012) Indica la clasificación estándar del tamaño del agregado a usarse en el concreto para la construcción de caminos y puentes. Así también ASTM C33 (2002) hace referencia a la especificación estándar de agregado para el concreto.

Según Torres (2010) manifiesta que la clasificación del agregado grueso para la mezcla el concreto permeable pueden ser redondeados triturados, tanto normales como de peso ligero cuyo tamaño oscila entre $\frac{3}{4}$ " a $\frac{3}{8}$ ".

Asimismo Flores & Pacompia (2015) señalan en su investigación que: "Los agregados de forma redondeada producen mayores resistencias, los agregados de mayor tamaño producen superficies mas asperas y los agregados de tamaño pequeño y textura suave son mas faciles de colocar aunque requieren una mayor cantidad de cemento" (Pág. 44)

ACI211 3R (1988) recomienda que la granulometría de agregado grueso lizadas, deben de satisfacer las exigencias respecto al tamaño y gradación según la norma ASTM C33 (Figura 11) o ASTM D448; estas son N° 67 ($\frac{3}{4}$ " a N°4), N°7 ($\frac{1}{2}$ " a N°4) y N° (3/8" a N°16)

Requisitos de calificación para gruesos Agregados													
Tamaño Número	Tamaño Nominal (Tamices con Abertura Cuadrada)	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas), % en peso											
		100 mm (4")	90 mm (3 1/2")	75 mm (3")	63 mm (2 1/2")	50 mm (2")	37.5 mm (1 1/2")	25.0 mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (1/2")	9.5 mm (3/8")	4.75 mm (N° 4)	300 µm (N° 50)
1	90 a 37.5 mm (3 1/2" a 1 1/2")	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 15				
2	63 a 37.5 mm (2 1/2" a 1 1/2")			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 15				
3	50 a 25.0 mm (2" a 1")				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 15			
357	50 a 4.75 mm (2" a N° 4)				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 15	
4	37.5 a 19.0 mm (1 1/2" a 3/4")					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15		0 a 15		
467	37.5 a 4.75 mm (1 1/2" a N° 4)					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 15	
5	25.0 a 12.5 mm (1" a 1/2")						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 15		
56	25.0 a 9.5 mm (1" a 3/8")						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	
57	25.0 a 4.75 mm (1" a N° 4)						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5
6	19.0 a 9.5 mm (3/4" a 3/8")							100	95 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	
67	19.0 a 4.75 mm (3/4" a N° 4)							100	95 a 100		20 a 55	5 a 10	0 a 5
7	12.5 a 4.75 mm (1/2" a N° 4)								100	95 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5
8	9.5 a 2.36 mm (3/8" a N° 8)									90 a 100	85 a 100	10 a 30	0 a 10
89	9.5 a 1.18 mm (3/8" a N° 16)									100	90 a 100	20 a 55	5 a 30
9	4.75 a 1.18 mm (N° 4 to N° 16)										100	85 a 100	10 a 40

Figura 11: Muestra los Husos granulométricos para poder realizar los diseños de mezclas (ASTM C33)

En general, la utilización de agregado fino en la elaboración de concreto permeable no está permitida, ya que ellos tienden a comprometer la capacidad de conexión del sistema de poros, salvo en los casos en los que se desea tener una resistencia a los agentes agresivos contenidos en el agua pluvial. Este resultado se obtiene introduciendo en la mezcla una cantidad de arena entre 150 y 200 kg/m³.

Propiedades físicas

Los ensayos realizados nos permiten conocer las propiedades físicas del agregado y diseñar un concreto permeable aceptable, las condiciones de los ensayos ponen a prueba a los agregados, su respuesta condiciona y pronostica su comportamiento durante el vaciado y en el concreto terminado. Los ensayos normalizados por la ASTM-C33 están descritos en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades físicas de los agregados para su aceptabilidad

Ensayo – Norma	ASTM	NTP	AASHTO
A. Análisis Granulométrico – Agregado Grueso y fino	C136	400.012	T27
B. Peso Unitario	C29	400.017	T19
C. Desgaste de Agregado – Método de los Ángeles	C131	400.019	T96

D. Gravedad específica y Absorción	C127	400.021	T81
---	------	---------	-----

Fuente: Norma, American Society for Testing and Materials – ASTM, Norma Técnica Peruana – NTP, y la Norma American Association of State Highway and Transportation Officials - ASSHTO

Análisis granulométrico del agregado grueso

Granulometría es la distribución por tamaños del agregado por medio del tamizado que consiste en pasar el material a través de malla de diferentes aberturas; estas son 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", #8 y #4 para agregados gruesos, con el peso de material retenido en cada malla, se obtiene el porcentaje retenido, así como, el porcentaje de material pasante en cada malla y se tiene el porcentaje de material retenido respecto al total de la muestra. Las Normas ASTM C136, AASHTO T27 y NTP 400.012, indican el procedimiento para desarrollar el análisis granulométrico de los agregados gruesos, cada gradación es representada por una medida numérica a la que se denomina huso granulométrico.

El Huso granulométrico, es el número de medida que se le asigna a la gradación del agregado cuando la distribución granulométrica calculada se encuentra dentro de los parámetros establecidos según ASTM (Figura 11), en la cual se inicia la identificación a partir del tamaño máximo nominal y del porcentaje retenido acumulado que tiene el agregado estudiado e indica los límites máximos y mínimos para su clasificación.

2.2.1.5.3. Agua

El agua que debe ser utilizada para la producción de concreto permeable debe tener la misma calidad que la que es utilizada en la elaboración de un concreto convencional, satisfaciendo los requisitos de la norma NTP 339.088 y ASTM C 109M. Considerándose como referente principal. La idoneidad del agua potable.

2.2.1.5.4. Aditivos

Según el ACI 522R-6 (2006)

Los aditivos son utilizados en concretos permeables para obtener propiedades especiales. Los aditivos utilizados deben satisfacer los

requisitos de la norma ASTM C494. Los aditivos reductores de agua (de mediano a alto rango) son utilizados dependiendo de la relación a/c. Los aditivos retardantes se utilizan para estabilizar y controlar la hidratación del cemento, y estos aditivos son frecuentemente preferidos cuando se trata con mezclas rígidas, como el concreto permeable, sobre todo en aplicaciones en climas cálidos. Los aditivos retardadores pueden actuar como lubricantes para ayudar a la descarga de concreto desde una mezcladora y pueden mejorar el manejo y las características de rendimiento en lugar. Los aceleradores se pueden utilizar cuando se colocan concretos permeables en climas fríos. Los aditivos incorporadores de aire no han sido comúnmente utilizados en concretos permeables, pero se pueden utilizar en ambientes susceptibles a la congelación y descongelación. Sin embargo, no existe un método fiable, para cuantificar el volumen de aire arrastrado en estos materiales.

2.2.2. Pavimentos permeables

2.2.2.1. Definición

Los pavimentos permeables se enmarcan dentro de los conocidos Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) y consisten en una capa de rodadura, que permite la filtración de la escorrentía hacia una capa de grava subyacente, donde se almacena temporalmente antes que se infiltre al terreno natural (si el terreno y la calidad de la escorrentía así lo permiten) o se evacúe fuera del sistema mediante drenes. Esta técnica se emplea básicamente en zonas con baja intensidad de tráfico, como zonas de aparcamiento, calles residenciales, zonas de recreo o aceras. (Flores & Pacompia, 2015)

2.2.2.2. Clasificación

Flores & Pacompia (2015), menciona la clasificación en donde divide a los pavimentos permeables en dos grupos:

Pavimentos permeables discontinuos

- Césped o grava con refuerzos.

- Adoquines con ranuras.

Pavimentos permeables continuos

- Mezcla bituminosa porosa
- Hormigón poroso.

Por otra parte, también existe la clasificación de pavimentos permeables según el destino final de las aguas filtradas, Dónde (**Schuler, 1987**) y **Woods – Ballard, 2007**) citado por Flores & Pacompia (2015), proponen:

- a) **Sistema de infiltración total:** Cuando la capacidad de infiltración del terreno es lo insuficientemente grande, se puede diseñar el pavimento permeable para que el agua infiltre en su totalidad hacia el mismo. Por lo tanto, el reservorio de piedras debe ser lo suficientemente grande para almacenar el volumen de agua pluvial, menos el volumen de agua que es infiltrado durante la lluvia. De ese modo el sistema provee el control total para todos los eventos de lluvia de magnitud inferior o igual a la lluvia de diseño.
- b) **Sistema de infiltración parcial con drenaje longitudinal:** Cuando la capacidad de infiltración del terreno es escasa o limitada, se completa la infraestructura con drenes longitudinales (tubería cribada) en las capas inferiores que evacúan el exceso de agua hacia la red convencional.
- c) **Sistema de infiltración nula:** Dado que la capacidad de infiltración del terreno es nula, el sistema debe contar necesariamente con drenes longitudinales en las capas inferiores que evacúan el agua almacenada a la red convencional. Esta alternativa se usa cuando la permeabilidad del suelo es muy baja (por ejemplo, en terrenos arcillosos), o cuando se requiere aprovechar el agua filtrada (en este caso la salida es hacia la red de aprovechamiento).

La selección del tipo de sistema se lleva a cabo en cuenta las propiedades del material que compone la subrasante y el propósito con el que se desea diseñar el sistema (CIRIA, 2007). En la figura 12 se observa el

funcionamiento de las diferentes clases de concreto permeable según el final de las aguas filtradas.

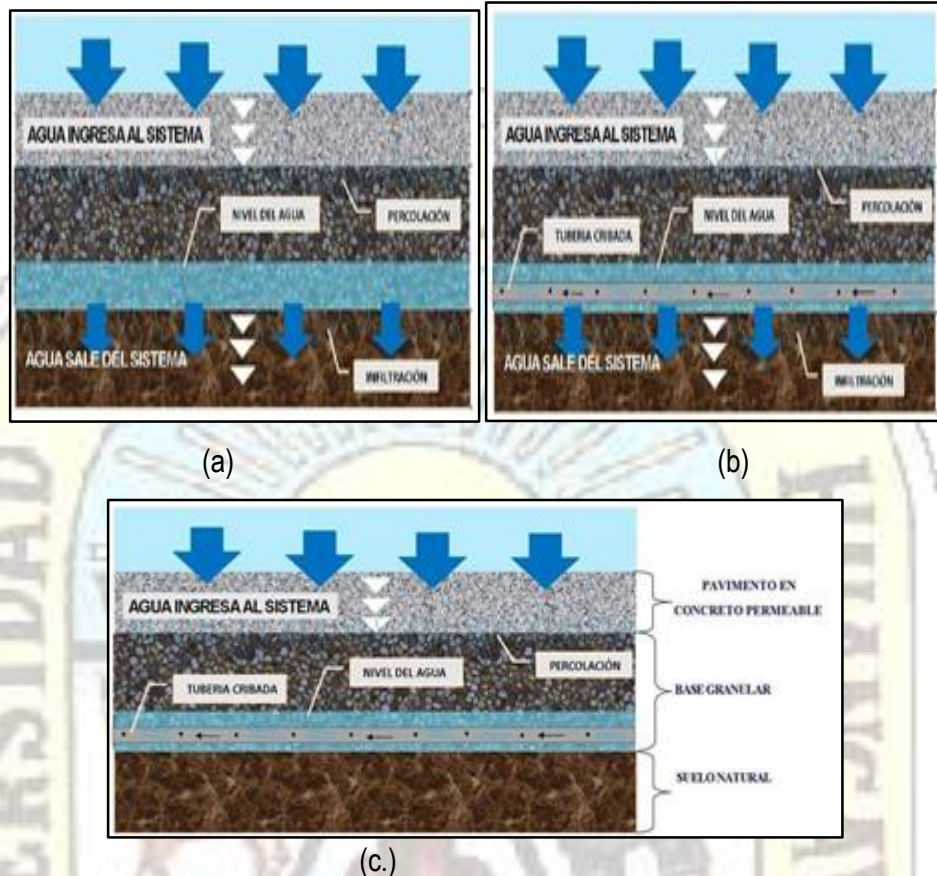


Figura 12: Clasificación de pavimentos permeable (Quispe, 2015)

- a. Sistema de filtración total.
- b. Sistema de filtración parcial.
- c. Sistema de filtración nula

2.2.2.3. Papel hidrológico de los pavimentos permeables

Diversos estudios han mostrado los importantes resultados de los pavimentos permeables en cuanto a la absorción del agua de escorrentía, en ayuda al ciclo natural del agua y recarga de acuíferos. Por ejemplo (Araujo, Tucci y Goldenfum, 2000) citado por Flores & Pacompia (2015); utilizaron un simulador de lluvias en módulos de 1 m² para comparar los valores de escurrimiento superficial generado por seis diferentes superficies utilizadas en la pavimentación como se distingue en la figura 13 y se obtuvieron los valores de escurrimiento superficial mostrados en figura 14.

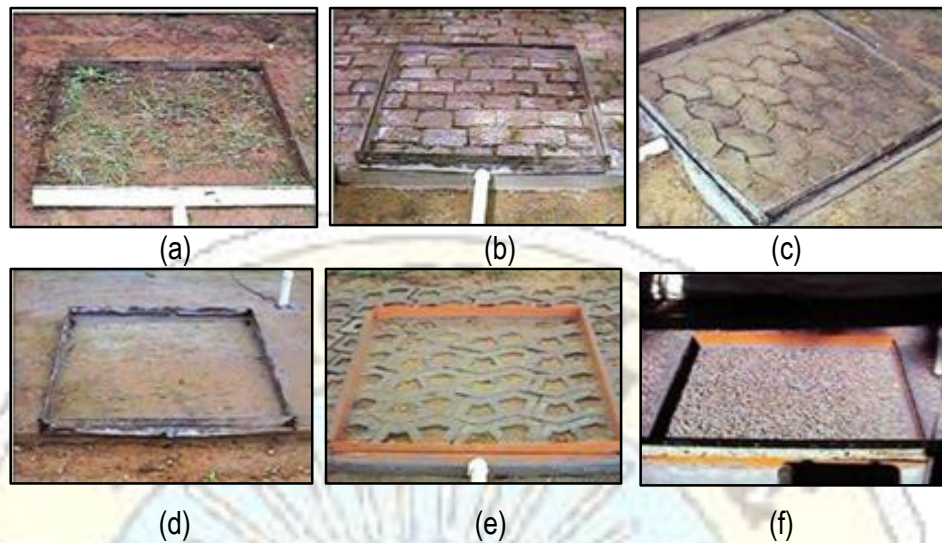


Figura 13: Módulo de 1m² utilizados en la simulación del escurrimiento superficial (Quispe, 2015):

a. Suelo compactado, b. Adoquinado, c. Concreto convencional, e. Bloque huecos de concreto y f. Concreto poroso.

Del gráfico que a continuación se muestra, podemos observar que la superficie que genera menores valores de escorrentía superficial es la de concreto permeable (poroso), mostrando así la funcionalidad de los mismos ante las precipitaciones simuladas.

Estudios acerca de un pavimento permeable construido sobre un suelo relativamente poco permeable mostraron que, incluso en ese caso, es posible conseguir la filtración de una gran parte de agua de lluvia. (Flores & Pacompia, 2015)

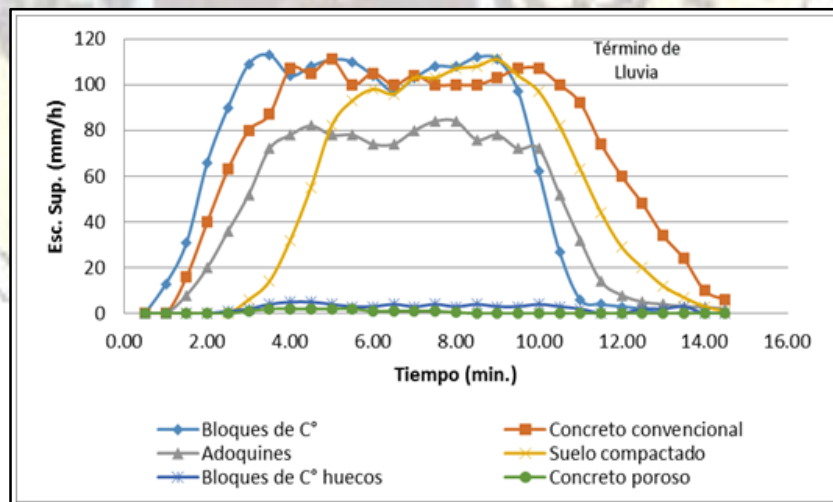


Figura 14: Esgurrimiento superficial observado en las diversas superficies ensayadas. (Flores & Pacompia, 2015)

2.2.2.3.1. Conceptualización del sistema

En la figura 15, se presentan esquemáticamente los procesos y las líneas de flujo características de un pavimento permeable, y en la figura 16 se observa que el esquema de funcionamiento del mismo.

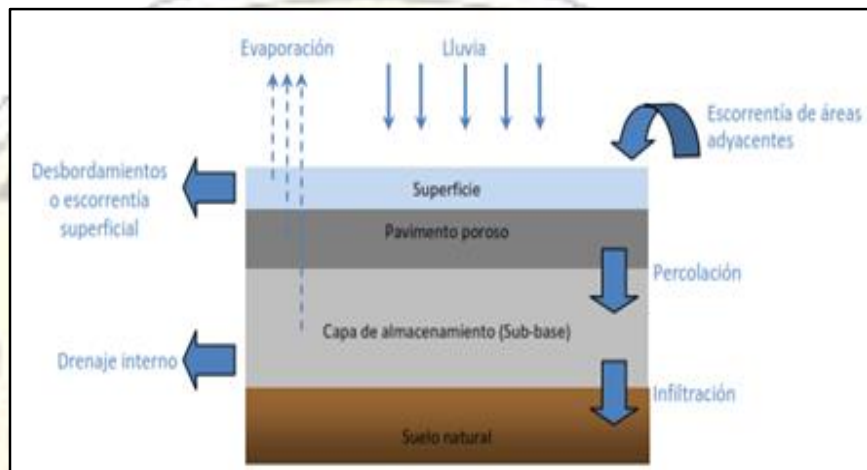


Figura 15: Esquema conceptual de flujos de un pavimento permeable. (Quispe, 2015)

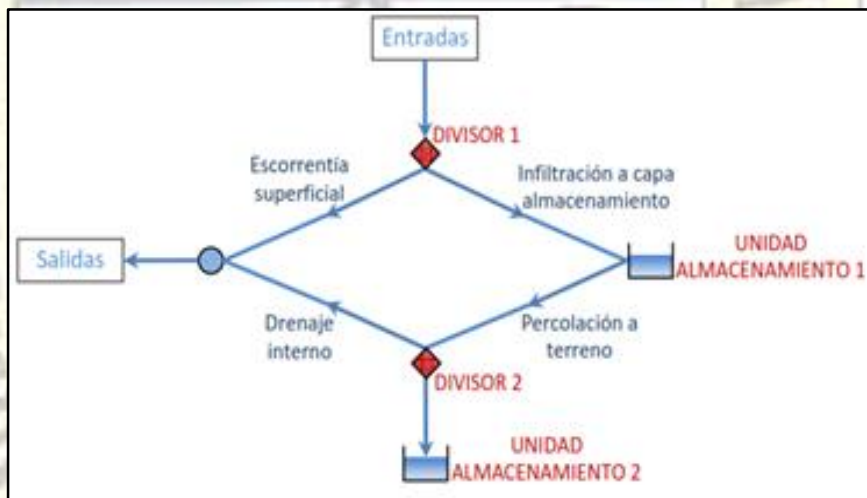


Figura 16: Conceptualización de un pavimento permeable. (Quispe, 2015)

La lluvia cae sobre el pavimento permeable (divisor 1), donde la intensidad de precipitación se compara con la tasa de filtración del pavimento permeable. Si la tasa de filtración del pavimento es mayor, la lluvia filtrada por el pavimento permeable es dirigida a la Unidad de Almacenamiento 1 (Sub-Base), que tiene una superficie igual al área del pavimento permeable y una profundidad igual a la altura de

capa de almacenamiento; caso contrario derivara en escorrentía superficial. Una vez agotada la capacidad de almacenamiento de la Unidad 1, el exceso de flujo se dirige al Divisor 2 (suelo natural 1). El caudal de entrada al Divisor 2 se compara con la conductividad hidráulica del suelo natural, de modo que, si el caudal de entrada es igual o inferior a la tasa de filtración hacia el suelo natural, se dirige a la unidad de Almacenamiento 2 (el suelo). Si el caudal al de entrada al Divisor 2 excede la tasa de infiltración hacia el suelo natural, se dirigirá hacia el sistema de drenaje, y de este a la salida del sistema, (Flores & Pacompia, 2015)

2.2.3. Análisis Hidrológico – Hidráulico en Pavimentos Permeables

El análisis de desempeño de los pavimentos permeables desde el punto de vista hidrológico e hidráulico es realizado con base en los datos cuantitativos de los fenómenos inmersos en el balance hídrico, los cuales son colectados por los dispositivos de monitoreo. Tales fenómenos son: Precipitación, escorrentía superficial, infiltración y evaporación; y se dividen en variables de entrada, variables de salida y de almacenamiento, (Barahona, Martinez, & Zelaya, 2013)

El dimensionamiento de infraestructuras como los pavimentos permeables debe tener como punto de partida la caracterización del régimen pluviométrico de la zona de aplicación de los mismos habitualmente, los métodos hidrológicos de diseño adoptan criterios de extremos vinculados a períodos de retorno para la definición de los parámetros de diseño (caudales de pico de avenida fundamentalmente). (Felipe & Castañeda, 2014)

El diseño hidrológico e hidráulico del pavimento permeable debe tener en cuenta cuatro aspectos esenciales: (1) Estimar las características de la filtración de la capa de pavimento, (2) determinar el volumen de almacenamiento (proporcionado por los poros de la sub base) para alcanzar tasa de rendimiento adecuadas, (3) estimar necesidad y en su caso cuantificar la capacidad de drenaje longitudinal adicional y (4) analizar la

respuesta del pavimento ante eventos extremos de precipitación. (Felipe & Castañeda, 2014)

La capacidad de infiltración de la propia capa de pavimento no suele ser un factor limitante en el diseño de éstos, pues suele ser al menos un orden de magnitud superior a las máximas intensidades de lluvia esperables, sin embargo, esta tasa se reduciría y estabilizaría con el tiempo debido a la colmatación, por lo que suele recomendar en el diseño adoptar en este valor un factor de seguridad de 10. (Flores & Pacompia, 2015)

La capacidad de almacenamiento en el propio pavimento depende directamente de las características del régimen de precipitación de la capacidad de filtración al terreno subyacente y está directamente relacionada con el espesor de cada una de las capas de pavimento y sus respectivos índices de huecos. (Flores & Pacompia, 2015)

2.2.3.1. Estudios Hidrológicos

La hidrología es la ciencia que investiga y estudia las propiedades y la distribución espacial y temporal del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Esto incluye las precipitaciones, escorrentía, la humedad en el suelo y la evapotranspiración. En cuanto a los pavimentos permeables, los estudios hidrológicos son fundamentales para un correcto dimensionamiento de los mismos y un adecuado diseño de mezclas del concreto permeable utilizado en ellos, específicamente en la determinación del volumen de almacenamiento de los pavimentos permeables y contenido de vacíos de diseño del concreto permeable.

La información hidrológica utilizada fue proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, 2015). Los datos caracterizados corresponden a los de la estación meteorológica CO-HUANCAVELICA de la ciudad de Huancavelica, por lo que se adoptan como representativos para realizar el diseño de concretos permeables que serán utilizados en pavimentos de la ciudad de Huancavelica.

2.2.3.1.1. Precipitación

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua.

La precipitación se mide en términos de la altura de lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de su precipitación, registrado su altura. Los aparatos de medición se clasifican de acuerdo con el registro de las precipitaciones, en pluviómetros (generalmente con lecturas cada 24 horas) y pluviógrafos (que registran la altura de lluvia en función del tiempo, permitiendo determinar la intensidad de la precipitación).

2.2.3.1.2. Infiltración

La velocidad con la que el agua es absorbida en el suelo se denomina la tasa de infiltración. Ésta mide la cantidad de tiempo que toma a la tierra absorber un cierto volumen de agua. Se suele medir en (mm/hora).

La tasa de infiltración en los sistemas de pavimento permeable se considera como la diferencia entre la precipitación y la variación del volumen de agua almacenado en el concreto permeable.

2.2.3.1.3. Periodo de retorno

El tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico en una creciente determinada es igualado o superado una vez cada "T" años, se le denomina Periodo de Retorno "T". Si se supone que los eventos anuales son independientes, es posible calcular la probabilidad de falla para una vida útil de "n" años.

De acuerdo a la mención de Zahed e Marcellini (1955), citado por (Flores & Pacompia, 2015), para escoger el tiempo de retorno de una tormenta para los proyectos de obras SUDS, debe ser considerado de acuerdo con la

naturaleza de obras a proyectar y disponibilidad de datos de precipitación de la región de interés. La determinación del tiempo de retorno de la lluvia del proyecto implica optar por un riesgo aceptable para la obra proyectada, estando también asociada a su costo, pues un nivel alto de seguridad exige un costo elevado.

Ven Te Chow y Máximo Villon, consideran criterios generalizados para la elección de periodos de retorno en estructuras de control de agua considerando 5-10 años y 2-10 años para alcantarillas de vías de tráfico ligero y estructuras de drenaje urbano; respectivamente.

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones el periodo de retorno deberá considerarse de 2 a 10 años en sistemas de drenaje pluvial urbano menores. El MVCyS propone dos periodos de retorno para la selección de la lluvia de diseño.

- T=5 años, si hacia aguas abajo existe una red de drenaje bien desarrollada.
- T=10 años, si no existe una red de drenaje bien desarrollada.

En términos prácticos se acostumbra adoptar como tiempo de retorno en proyectos de estructuras de infiltración total, un tiempo de 10 años (Torres, 2009).

Por lo tanto, para la determinación de la intensidad del evento de diseño, se considera un **periodo de retorno de 10 años**.

2.2.3.1.4. Análisis de la precipitación máxima en 24 horas.

El concreto permeable no se diseña con el valor de precipitación antecedente más alto existente (en 24 horas), sino que se selecciona un evento de importante magnitud que se repite cada cierto periodo de tiempo, a esta se le denomina periodo de retorno. Con este se garantiza que el sistema se vea excedido en su capacidad pocas veces durante su vida útil. A el periodo de retorno se le suma la intensidad de la lluvia y la duración, aspectos que complementan y permiten hacer la mejor selección de la precipitación de diseño, para dimensionar el volumen de almacenamiento (Lian, 2010).

Por tanto, utilizando la información disponible de precipitación máximas en 24 horas correspondiente al periodo 1990-2014, que nos proporcionó el SENAMHI (2015)

Tabla 2: Precipitación máxima en 24 horas

ESTACIÓN : CO - HUANCVELICA **DEPARTAMENTO** : HUANCVELICA
LATITUD : 12° 46' 17.66" Sur **PROVINCIA** : HUANCVELICA
LONGITUD : 75° 00' 44.52" Oeste **DISTRITO** : HUANCVELICA
ALTITUD : 3701 msnm
Parametron : Precipitación Máxima de 24 Horas (mm)

MES\AÑO	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
ENERO	24.40	10.20	3.20	SD	20.70	21.00	12.60	9.60	14.90	16.90	12.00
FEBRERO	6.90	7.60	9.00	SD	25.60	16.30	15.90	11.00	10.80	13.10	12.40
MARZO	16.70	12.40	11.40	SD	18.40	17.10	15.00	11.00	10.00	9.10	10.90
ABRIL	9.80	25.80	14.00	SD	13.20	15.80	7.60	7.10	9.30	11.70	10.40
MAYO	9.70	6.00	2.40	19.60	13.30	7.40	9.20	4.40	1.10	9.00	4.30
JUNIO	14.40	3.20	9.70	18.60	9.20	2.40	5.20	5.60	5.80	2.80	3.70
JULIO	5.00	0.00	21.60	10.40	8.60	6.60	5.50	0.00	0.00	3.90	6.30
AGOSTO	9.50	0.00	6.60	18.80	7.00	0.00	8.80	7.60	5.90	3.50	6.10
SETEMBRE	6.40	SD	4.30	21.50	11.40	12.60	9.00	16.00	5.00	12.30	9.60
OCTUBRE	11.30	SD	10.90	27.00	17.00	7.40	6.10	8.70	8.60	11.30	10.90
NOVIEMBRE	10.60	SD	4.40	29.20	12.20	9.00	7.60	17.60	7.20	8.10	9.40
DICIEMBRE	12.00	SD	12.00	22.80	13.20	8.40	11.60	11.40	30.50	9.30	8.90
SUMA	136.70	65.20	109.50	167.90	169.80	124.00	114.10	110.00	109.10	111.00	104.90

DÍA	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
ENERO	12.10	9.70	17.80	8.00	13.20	13.60	8.90	12.70	30.60	21.30	24.90	14.50	17.80	17.80
FEBRERO	13.20	21.80	28.80	14.70	10.00	14.00	15.20	16.50	85.50	15.50	27.20	31.40	24.20	16.00
MARZO	28.30	26.20	30.40	15.20	11.40	10.90	13.80	9.90	18.90	14.90	25.50	20.20	37.40	12.40
ABRIL	8.80	9.40	17.30	9.40	11.90	12.60	9.40	3.60	12.50	10.50	12.10	25.50	16.20	12.90
MAYO	7.30	6.30	5.50	4.20	6.90	0.00	5.50	2.70	5.80	3.80	4.10	5.10	8.90	16.70
JUNIO	0.00	5.80	0.00	11.60	3.80	5.20	0.00	2.50	2.10	2.10	1.10	4.60	5.40	2.90
JULIO	11.20	10.00	7.40	10.70	2.10	0.00	2.70	5.90	11.20	0.00	7.80	5.90	5.40	8.10
AGOSTO	8.20	10.30	10.50	10.40	2.30	8.50	3.60	9.60	5.00	4.80	5.40	3.70	21.50	5.10
SEPTIEMBRE	11.20	10.80	12.20	11.20	10.90	6.80	9.90	7.60	9.20	4.50	11.70	25.70	14.60	12.60
OCTUBRE	10.00	11.20	11.00	7.60	9.00	11.00	9.30	13.50	11.60	23.50	8.50	13.60	14.80	15.10
NOVIEMBRE	12.20	14.40	6.30	11.70	10.00	10.20	9.90	8.20	16.80	24.30	24.50	23.80	6.30	7.70
DICIEMBRE	10.70	15.50	17.00	15.50	8.60	11.90	10.90	10.20	15.60	21.50	20.60	37.50	23.00	15.10
SUMA	133.20	151.40	164.20	130.20	100.10	104.70	99.10	102.90	224.80	146.70	173.40	211.50	195.50	142.40

Fuente: SENAMHI, 2015.

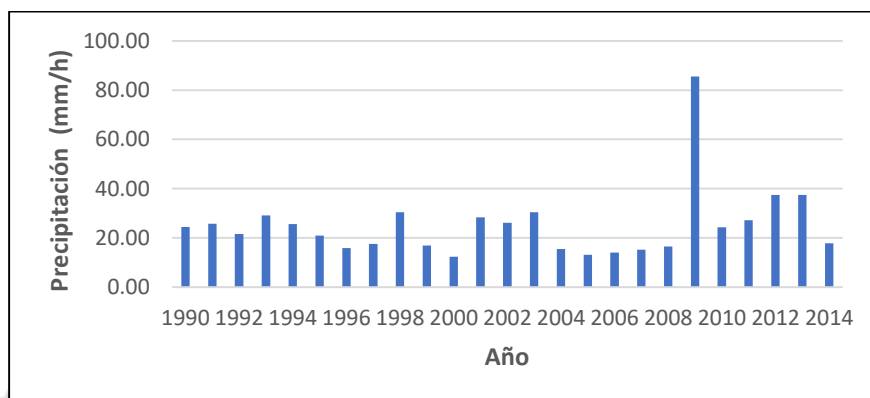


Figura 17: Precipitación máxima en 24 Horas (1990-2014)

Posteriormente se calculó la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno. Considerando las funciones de distribución de Log Pearson tipo III y Gumbel.

Tabla 3: Precipitación máxima en 24 horas valores máximos anuales

Nº	Año	Datos
1	1990	24.40
2	1991	25.80
3	1992	21.60
4	1993	29.20
5	1994	25.60
6	1995	21.00
7	1996	15.90
8	1997	17.60
9	1998	30.50
10	1999	16.90
11	2000	12.40
12	2001	28.30
13	2002	26.20
14	2003	30.40
15	2004	15.50
16	2005	13.20
17	2006	14.00
18	2007	15.20
19	2008	16.50
20	2009	85.50
21	2010	24.30

22	2011	27.20
23	2012	37.50
24	2013	37.40
25	2014	17.80

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de precipitación máxima en 24 horas, fueron ajustados a la distribución de **Log-Pearson tipo III y Gumbel**, que son las comúnmente usadas en estudios hidrológicos.

Tabla 4: Parámetros de Distribución Log – Pearson tipo III con momentos ordinarios

β (Parámetro de escala)	0.2382
α (Parámetro de localización)	2.3765
ξ (Parámetro de forma)	3.1466

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Parámetros de Distribución Log – Pearson tipo III con momentos lineales

β (Parámetro de escala)	0.1614
α (Parámetro de localización)	2.0499
ξ (Parámetro de forma)	6.6673

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Resultados de la distribución Log – Pearson tipo III

Nº	VALOR ACTUAL	PROBABILIDAD DE WEIBULL
1	12.4	0.0385
2	13.2	0.0769
3	14	0.1154
4	15.2	0.1538
5	15.5	0.1923
6	15.9	0.2308
7	16.5	0.2692
8	16.9	0.3077
9	17.6	0.3462
10	17.8	0.3846
11	21	0.4231
12	21.6	0.4615
13	24.3	0.5
14	24.4	0.5385
15	25.6	0.5769
16	25.8	0.6154

17	26.2	0.6538
18	27.2	0.6923
19	28.3	0.7308
20	29.2	0.7692
21	30.4	0.8077
22	30.5	0.8462
23	37.4	0.8846
24	37.5	0.9231
25	85.5	0.9615

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Resultados Final de la distribución de Log Pearson tipo III

T	Precipitación
2	21.08
5	31.17
10	40.15
25	54.66
50	68.20
100	84.46
200	103.96
500	135.63

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Parámetros de Distribución Gumbel con momentos ordinarios

Media	25.20
Desviación Estándar	14.4750
u (Parámetro de localización)	18.6835
d (Parámetro de concentración)	11.2826

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Parámetros de Distribución Log – Pearson tipo III con momentos lineales

Media	25.20
Desviación Estándar	14.4750
u (Parámetro de localización)	19.8631
d (Parámetro de concentración)	9.239

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Resultados de la distribución de Gumbel

Nº	VALOR ACTUAL	PROBABILIDAD DE WEIBULL
1	12.4	0.0385
2	13.2	0.0769
3	14	0.1154
4	15.2	0.1538
5	15.5	0.1923
6	15.9	0.2308
7	16.5	0.2692
8	16.9	0.3077
9	17.6	0.3462
10	17.8	0.3846
11	21	0.4231
12	21.6	0.4615
13	24.3	0.5
14	24.4	0.5385
15	25.6	0.5769
16	25.8	0.6154
17	26.2	0.6538
18	27.2	0.6923
19	28.3	0.7308
20	29.2	0.7692
21	30.4	0.8077
22	30.5	0.8462
23	37.4	0.8846
24	37.5	0.9231
25	85.5	0.9615

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11: Resultados Final de la distribución de Gumbel

Gumbel		
T	Precipitacion	Prob($P_{max} \leq x$)
2	23.02	0.500
5	38.04	0.800
10	47.99	0.900
25	60.56	0.960
50	69.89	0.980
100	79.14	0.990

200	88.37	0.995
500	100.53	0.998

Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, se consideró las proyecciones en base a los datos obtenidos mediante la distribución Gumbel, es así que, para un periodo de retorno de 10 años, el valor de la Precipitación Máxima es de 24 horas estimada es de **47.99 mm.**

Pruebas de Bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste se efectúan con la finalidad de determinar cuál de las distribuciones probabilísticas consideradas se ajusta mejor a la serie histórica de datos. Esto permite seleccionar la distribución con la cual se efectúan las proyecciones de intensidades máximas para diferentes periodos de retorno.

Utilizaremos la prueba de bondad de ajuste de **Smirnov-Kolmogorov**, porque se desea verificar o negar que un conjunto de datos pseudoaleatorios tienen una distribución uniforme (Valores máximos anuales de precipitación máxima en 24 horas).

Tabla 12: Resultados de la distribución Log – Pearson tipo III

N°	FRECUENCIA OBSERVADA ACUMULADA	FRECUENCIA ESPERADA	D
1	0.0171	0.0398	0.0213
2	0.0448	0.0669	0.0321
3	0.0833	0.1005	0.0321
4	0.1536	0.1598	0.0002
5	0.1725	0.1757	0.0198
6	0.1981	0.1975	0.0326
7	0.2368	0.2309	0.0324
8	0.2626	0.2534	0.0451
9	0.3069	0.2929	0.0393
10	0.3193	0.3041	0.0653
11	0.4962	0.4719	0.0731
12	0.5243	0.4999	0.0627
13	0.6316	0.6105	0.1316

14	0.6351	0.6141	0.0966
15	0.6735	0.6549	0.0966
16	0.6794	0.6613	0.064
17	0.6909	0.6736	0.0371
18	0.7177	0.7025	0.0254
19	0.744	0.7312	0.0132
20	0.7634	0.7524	0.0059
21	0.7865	0.7779	0.0212
22	0.7883	0.7799	0.0578
23	0.8778	0.8788	0.0068
24	0.8787	0.8798	0.0444
25	0.9903	0.9939	0.0288

D (Teórico)	0.1461
d (Tabular)	0.272
Resultado	"Se acepta"

Fuente: Elaboración propia.

Como el delta teórico 0.1461, es menor que el delta tabular 0.272. Los datos se ajustan a la distribución Log-Pearson tipo 3, con un nivel de significación del 5%

Tabla 13: Resultados de la distribución Gumbel

N°	FRECUENCIA OBSERVADA ACUMULADA	FRECUENCIA ESPERADA	D
1	0.1746	0.1061	0.1361
2	0.1967	0.1279	0.1198
3	0.2199	0.1516	0.1045
4	0.2562	0.1908	0.1024
5	0.2655	0.2012	0.0732
6	0.2781	0.2153	0.0473
7	0.2971	0.2371	0.0279
8	0.31	0.2521	0.0023
9	0.3326	0.2787	0.0135
10	0.3391	0.2864	0.0455
11	0.4429	0.413	0.0198
12	0.462	0.4367	0.0005
13	0.5445	0.5387	0.0445
14	0.5474	0.5423	0.009
15	0.5818	0.5842	0.0048

16	0.5873	0.591	0.0281
17	0.5983	0.6043	0.0555
18	0.6249	0.6364	0.0674
19	0.6528	0.6695	0.0779
20	0.6745	0.6949	0.0947
21	0.7019	0.7264	0.1058
22	0.7041	0.7289	0.1421
23	0.8267	0.8608	0.0579
24	0.8281	0.8622	0.095
25	0.9973	0.9992	0.0358

D (Teórico)	0.1421
d (Tabular)	0.2720
Resultado	"Se acepta"

Fuente: Elaboración propia.

Como el delta teórico 0.1421, es menor que el delta tabular 0.2720. Los datos se ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significación del 5%

- Por lo tanto, La distribución que presenta mejor ajuste a los datos históricos es la distribución Gumbel, como se muestra en la tabla 12 ya que la diferencia entre el estadístico por tabla y el estadístico S-K es mayor que la que se obtiene de la distribución Log Pearson Tipo III.
- Es por eso que se consideró las proyecciones en base a los datos obtenidos mediante la distribución Gumbel, es así que, para un Periodo de Retorno de 10 años, el valor de la Precipitación Máxima en 24 horas estimada es de **47.99 mm**. Tal como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 14: Precipitación Máxima en 24 horas para periodos de Retorno (T)

Gumbel		
Periodo de Retorno T (años)	Precipitación Máx. (mm.)	Prob($P_{max} \leq x$)
2	23.02	0.500
5	38.04	0.800
10	47.99	0.900

25	60.56	0.960
50	69.89	0.980
100	79.14	0.990
200	88.37	0.995
500	100.53	0.998

Fuente: Elaboración propia

2.2.3.1.5. Intensidad, duración y frecuencia

Se define tormenta al conjunto de lluvias que obedecen a una misma perturbación meteorológica y de características bien definidas. Una tormenta puede durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y aún días y puede abarcar desde una zona pequeña hasta una extensa región.

De las tormentas interesa conocer las curvas IDF, intensidad – duración – frecuencia, en las que fácilmente se pueden obtener el dato de intensidad para cualquier periodo de tiempo requerido.

Intensidad

Se mide en mm/h. y su valor varía durante la tormenta. Debido a que no se cuenta con registros pluviográficos que permitan obtener las intensidades máximas, se calcularán a partir de los datos de precipitación máxima en 24 horas en base al modelo de Dick y Peschke, la expresión es la siguiente:

$$P_d = P_{24h} \cdot \left(\frac{d}{1440}\right)^{0.25}$$

Dónde:

Pd : Precipitación total (mm.)

P24h : Precipitación máxima en 24 horas (mm.)

d : Duración (h)

La intensidad se halla dividiendo la precipitación Pd entre la duración:

$$I = \frac{P_d}{d}$$

Dónde:

I: Intensidad (mm/h.)

Pd: Precipitación total (mm.)

d: Duración (h)

Duración

La duración se mide en minutos o en horas. Es el tiempo transcurrido entre el comienzo y el fin de la tormenta.

El periodo de duración es un periodo de tiempo dentro de una duración de la tormenta. Se escogen varios periodos de duración. Por ejemplo 15,30,60,120,240 minutos. Los que se busca, como veremos, son las intensidades máximas para estos periodos de duración.

Para la determinación de la Intensidad del evento de diseño, en términos generales se considera una duración de tormenta de diseño de 60 minutos (Flores & Pacompia, 2015)

Tabla 15: Intensidades máximas (mm/h)

Años	Precipitación Máxima (24 Hrs)	PERIODO DE DURACIÓN											
		15 minutos		30 minutos		60 minutos		120 minutos		180 minutos		240 minutos	
		Pd	I	Pd	I	Pd	I	Pd	I	Pd	I	Pd	I
		mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm/h	Mm	mm/h	mm	mm/h	Mm	mm/h
1990	24.40	7.80	31.18	9.27	18.54	11.02	11.02	13.11	6.55	14.51	4.84	15.59	3.90
1991	25.80	8.24	32.97	9.80	19.60	11.66	11.66	13.86	6.93	15.34	5.11	16.48	4.12
1992	21.60	6.90	27.60	8.21	16.41	9.76	9.76	11.61	5.80	12.84	4.28	13.80	3.45
1993	29.20	9.33	37.31	11.09	22.19	13.19	13.19	15.69	7.84	17.36	5.79	18.66	4.66
1994	25.60	8.18	32.71	9.73	19.45	11.57	11.57	13.75	6.88	15.22	5.07	16.36	4.09
1995	21.00	6.71	26.84	7.98	15.96	9.49	9.49	11.28	5.64	12.49	4.16	13.42	3.35
1996	15.90	5.08	20.32	6.04	12.08	7.18	7.18	8.54	4.27	9.45	3.15	10.16	2.54
1997	17.60	5.62	22.49	6.69	13.37	7.95	7.95	9.46	4.73	10.47	3.49	11.25	2.81
1998	30.50	9.74	38.98	11.59	23.17	13.78	13.78	16.39	8.19	18.14	6.05	19.49	4.87
1999	16.90	5.40	21.60	6.42	12.84	7.64	7.64	9.08	4.54	10.05	3.35	10.80	2.70
2000	12.40	3.96	15.85	4.71	9.42	5.60	5.60	6.66	3.33	7.37	2.46	7.92	1.98
2001	28.30	9.04	36.16	10.75	21.50	12.79	12.79	15.21	7.60	16.83	5.61	18.08	4.52
2002	26.20	8.37	33.48	9.95	19.91	11.84	11.84	14.08	7.04	15.58	5.19	16.74	4.19
2003	30.40	9.71	38.85	11.55	23.10	13.73	13.73	16.33	8.17	18.08	6.03	19.42	4.86
2004	15.50	4.95	19.81	5.89	11.78	7.00	7.00	8.33	4.16	9.22	3.07	9.90	2.48

2005	13.20	4.22	16.87	5.01	10.03	5.96	5.96	7.09	3.55	7.85	2.62	8.43	2.11
2006	14.00	4.47	17.89	5.32	10.64	6.33	6.33	7.52	3.76	8.32	2.77	8.95	2.24
2007	15.20	4.86	19.42	5.77	11.55	6.87	6.87	8.17	4.08	9.04	3.01	9.71	2.43
2008	16.50	5.27	21.09	6.27	12.54	7.45	7.45	8.87	4.43	9.81	3.27	10.54	2.64
2009	85.50	27.31	109.26	32.48	64.97	38.63	38.63	45.94	22.97	50.84	16.95	54.63	13.66
2010	24.30	7.76	31.05	9.23	18.46	10.98	10.98	13.06	6.53	14.45	4.82	15.53	3.88
2011	27.20	8.69	34.76	10.33	20.67	12.29	12.29	14.61	7.31	16.17	5.39	17.38	4.34
2012	37.50	11.98	47.92	14.25	28.49	16.94	16.94	20.15	10.07	22.30	7.43	23.96	5.99
2013	37.40	11.95	47.79	14.21	28.42	16.90	16.90	20.09	10.05	22.24	7.41	23.90	5.97
2014	17.80	5.69	22.75	6.76	13.53	8.04	8.04	9.56	4.78	10.58	3.53	11.37	2.84

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Intensidades máximas de lluvia de diseño (mm/h)

Valor Calculado de P. Max en 24 Horas	PERIODO DE DURACIÓN											
	15 minutos		30 minutos		60 minutos		120 minutos		180 minutos		240 minutos	
	Pd	I	Pd	I	Pd	I	Pd	I	Pd	I	Pd	I
	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm/h	mm	mm/h
47.99	15.33	61.33	18.23	36.47	21.68	21.68	25.79	12.89	28.54	9.51	30.66	7.67

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia

Es el número de veces que se repite un evento extremo en el tiempo, es decir, es el intervalo de repetición promedio entre eventos que exceden una magnitud específica.

Usualmente se calcula con la fórmula de Weibull

$$F = m/(n + 1) \quad T = (n + 1)/m$$

Dónde:

F: Frecuencia de ocurrencia.

N: Número total de años de observación.

m: Posición de la variable o número de orden.

T: Periodo de retorno.

Tabla 17: Intensidades máximas de lluvia de diseño (mm/h)

Orden (m)	T (años)	DURACIÓN EN MINUTOS					
		15	30	60	120	180	240
1	26.00	109.26	64.97	38.63	22.97	16.95	13.66
2	13.00	47.92	28.49	16.94	10.07	7.43	5.99
3	8.67	47.79	28.42	16.90	10.05	7.41	5.97
4	6.50	38.98	23.17	13.78	8.19	6.05	4.87
5	5.20	38.85	23.10	13.73	8.17	6.03	4.86
6	4.33	37.31	22.19	13.19	7.84	5.79	4.66
7	3.71	36.16	21.50	12.79	7.60	5.61	4.52
8	3.25	34.76	20.67	12.29	7.31	5.39	4.34
9	2.89	33.48	19.91	11.84	7.04	5.19	4.19
10	2.60	32.97	19.60	11.66	6.93	5.11	4.12
11	2.36	32.71	19.45	11.57	6.88	5.07	4.09
12	2.17	31.18	18.54	11.02	6.55	4.84	3.90
13	2.00	31.05	18.46	10.98	6.53	4.82	3.88
14	1.86	27.60	16.41	9.76	5.80	4.28	3.45
15	1.73	26.84	15.96	9.49	5.64	4.16	3.35
16	1.63	22.75	13.53	8.04	4.78	3.53	2.84
17	1.53	22.49	13.37	7.95	4.73	3.49	2.81
18	1.44	21.60	12.84	7.64	4.54	3.35	2.70
19	1.37	21.09	12.54	7.45	4.43	3.27	2.64
20	1.30	20.32	12.08	7.18	4.27	3.15	2.54
21	1.24	19.81	11.78	7.00	4.16	3.07	2.48
22	1.18	19.42	11.55	6.87	4.08	3.01	2.43
23	1.13	17.89	10.64	6.33	3.76	2.77	2.24
24	1.08	16.87	10.03	5.96	3.55	2.62	2.11
25	1.04	15.85	9.42	5.60	3.33	2.46	1.98

Fuente: Elaboración propia.

Para trazar las curvas IDF, se calculan los parámetros de la ecuación:

$$I = K * T^m / t^n$$

Dónde:

I: Intensidad máxima (mm/h)

K, m, n: Factores característicos de la zona de estudio.

T: Periodo de retorno (años)

t: Duración de la precipitación (mín)

Curva de Intensidad, Duración y Frecuencia

La curva IDF, es una relación entre las intensidades promedio máximas esperadas, para cada duración de precipitación, para una frecuencia determinada o periodo de retorno en promedio. Sintetiza el comportamiento pluviométrico de una zona.

Curva IDF IILA – Senamhi

En el marco de un convenio de cooperación entre el Instituto Ítalo Latinoamericano IILA, el Servicio de Meteorología e Hidrología SENAMHI y al Universidad Nacional de Ingeniería UNI en 1983, desarrollaron una familia de curvas de IDF, para las distintas regiones del Perú, que tiene la siguiente formulación.

$$I(t, T) = a(1 + k \log T) \cdot (t + b)^{n-1}$$

Para una duración de la tormenta de $t < 3$ horas. Dónde:

I: Intensidad de lluvia (mm/h).

a: Parámetro de intensidad (mm).

k: Parámetro de frecuencia adimensional

b: Parámetro (hora) 0.5 horas (Costa, centro y sur)

0.4 horas (Sierra).

0.2 horas (Costa norte y selva)

n: Parámetro de duración (adimensional).

t: Duración (hora).

T: Tiempo de retorno.

Este método divide el territorio nacional en zonas y sub-zonas pluviométricas, las cuales poseen características afines, la subcuenca del río Ichu se encuentra íntegramente en la zona pluviométrica 123₉.

Los valores de los parámetros considerados para la zona 123₉ son:

Zona: 123₉.

a: 12.1

k: 0.553

b: 0.4

n: 0.242

Quedando la fórmula expresada de la siguiente manera:

$$I(t, T) = 11(1 + 0.553 \log T) \cdot (t + 0.4)^{0.38 - 1}$$

Dónde:

t: Duración (hora).

T: Tiempo de retorno.

Tabla 18: Valores de Curva IDF Método IILA – SENAMHI

t (min)	DURACIÓN EN MINUTOS					
	Periodo de Retorno T (años)					
	2	5	10	25	50	100
5	24.49	29.11	32.61	37.23	40.72	44.22
10	21.71	25.80	28.90	33.00	36.10	39.19
15	19.56	23.26	26.05	29.74	32.53	35.32
20	17.86	21.22	23.77	27.14	29.69	32.24
25	16.46	19.56	21.91	25.01	27.36	29.71
30	15.29	18.17	20.35	23.24	25.42	27.60
35	14.30	16.99	19.03	21.73	23.77	25.81
40	13.44	15.98	17.89	20.43	22.35	24.27
45	12.70	15.09	16.90	19.30	21.11	22.92
50	12.04	14.31	16.03	18.30	20.02	21.74
55	11.46	13.62	15.25	17.42	19.05	20.69
60	10.94	13.00	14.56	16.62	18.19	19.75

65	10.47	12.44	13.94	15.91	17.41	18.90
70	10.04	11.94	13.37	15.27	16.70	18.13
75	9.66	11.48	12.86	14.68	16.06	17.43
80	9.30	11.06	12.38	14.14	15.47	16.79
85	8.98	10.67	11.95	13.65	14.93	16.21
90	8.68	10.31	11.55	13.19	14.43	15.67
95	8.40	9.98	11.18	12.77	13.97	15.16
100	8.14	9.68	10.84	12.37	13.54	14.70
105	7.90	9.39	10.52	12.01	13.14	14.26
110	7.68	9.12	10.22	11.67	12.76	13.86
115	7.47	8.87	9.94	11.35	12.41	13.48
120	7.27	8.64	9.68	11.05	12.09	13.12

Fuente: Elaboración propia.

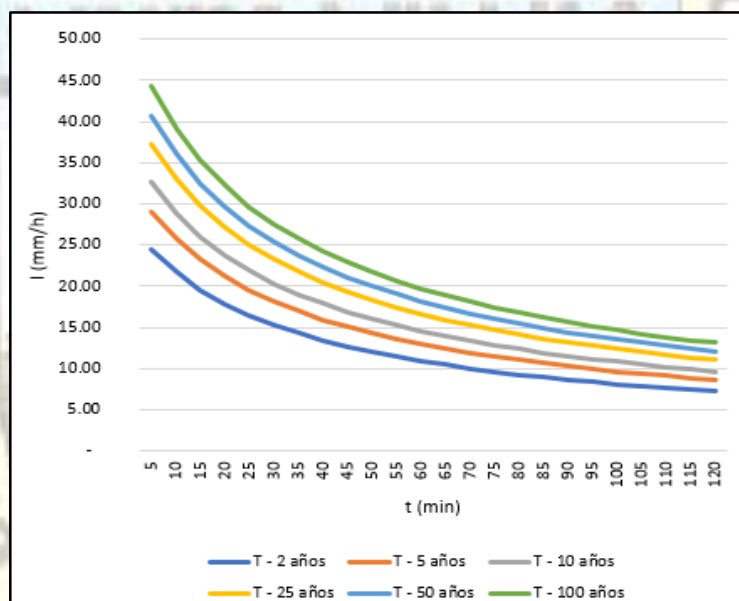


Figura 18: Curva de intensidad, duración y frecuencia

2.2.3.1.6. Determinación de la Intensidad de Lluvia de diseño

Para la determinación de la tasa de filtración que debe tener el concreto permeable utilizado en los pavimentos permeables de la ciudad de Huancavelica, tomamos en cuenta que éste debe ser al menos un orden de magnitud superior a las máximas intensidades de lluvia esperables. Sin embargo esta tasa se reduciría y estabilizaría con el tiempo debido a la

colmatación, por lo que se suele recomendar en el diseño adoptar en este valor un factor de seguridad de 10 (Flores & Pacompia, 2015)

La precipitación máxima en 24 horas estimada para un periodo de retorno de 10 años es de 47.99 mm, tal como se muestra en la tabla 13 Y mediante las ecuaciones de Dick y Perchke, para una duración de 1 hora obtenemos la Intensidad de lluvia de 21.68 mm/h. Obteniéndose una **intensidad de lluvia de diseño de 216.80 mm/h**, considerando el factor de rendimiento ante la colmatación del pavimento permeable.

2.2.3.2. Estudios Hidráulicos

2.2.3.2.1. Dimensionamiento del pavimento permeable.

El dimensionamiento hidráulico – hidrológico permite determinar el espesor del reservorio necesario para almacenar el volumen de agua que precipita sobre el pavimento para un determinado tiempo de retorno, menos el volumen que infiltra en el suelo, o el volumen drenado, durante ese tiempo. Ese espesor debe ser comparado con el obtenido en el dimensionamiento mecánico, debiendo ser adoptada el mayor de los espesores. (Kamali, Delkash, & Tajrishy, 2016)

El dimensionamiento implica la determinación del volumen drenado por la superficie o por otra contribuyente de escorrentía para el área del pavimento. Para el dimensionamiento de un sistema de infiltración total, el reservorio (Sub Base) debe ser lo suficientemente grande para acomodar el volumen de escurrimiento de una lluvia del proyecto, menos el volumen de escurrimiento que es infiltrado durante la lluvia.

2.2.3.3. Proceso constructivo

2.2.3.3.1. Generalidades

El concreto permeable se usa principalmente en pavimentos, con el fin de permitir la infiltración del agua a través de su superficie y el almacenamiento temporal de esta en la Sub-Base, para su posterior

disposición o infiltración en el terreno. Son utilizados principalmente en estacionamientos y calles de bajo tránsito, con el objeto de disminuir el escurrimiento superficial proveniente de las aguas de lluvia y la incidencia de éstas aguas abajo. Todos los procesos constructivos (Preparación de la Sub rasante, mezclado, transporte, colocación, encofrado, compactación, juntas, curado, mantenimiento, supervisión y control de calidad) están descritos en los alcances de la norma ACI 522R-10 (2010) "Reporto Previous Concrete"

En la figura 19 se muestran las diferentes capas que componen a un pavimento permeable típico.

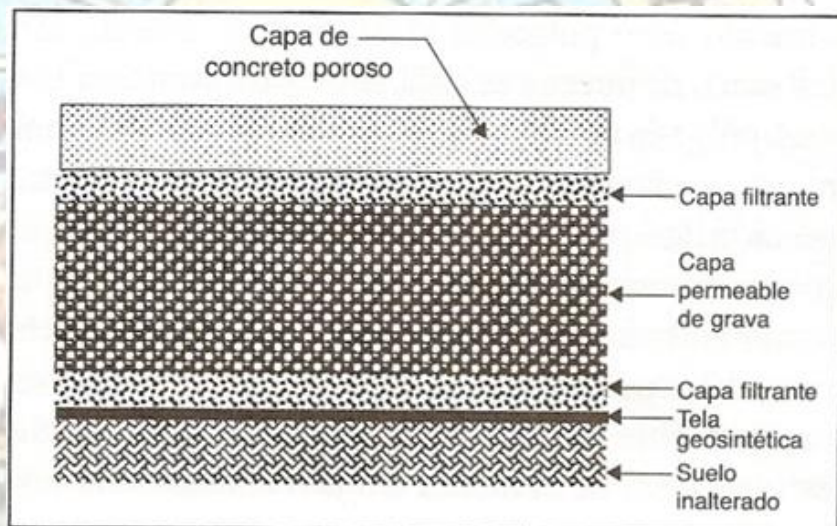


Figura 19: Estructura de un pavimento de concreto permeable (ACI 522, 2006).

El procedimiento de colocación es ligeramente distinto al concreto convencional, principalmente porque utiliza un método de compactación especial y porque se debe prevenir el deterioro de la permeabilidad del suelo natural durante la construcción.

El uso de estos pavimentos, está contraindicado en zonas o terrenos con suelos impermeables, zonas de alto tráfico, o donde exista alta posibilidad de colmatación. (Flores & Pacompia, 2015)

2.2.3.3.2. Preparación de la Sub-rasante

El suelo natural encontrado en cualquier proyecto deberá muestrearse y someterse a pruebas para permeabilidad y capacidad de carga. La uniformidad del soporte de la sub-rasante, en lugar de la resistencia, es el mejor criterio para una adecuada selección de la sub-rasante. El pavimento de concreto permeable tiene una losa que distribuye las cargas sobre una gran área similar a la del pavimento de concreto convencional. Esta distribución de carga disminuye la presión en la sub-rasante y elimina la necesidad de grandes espesores de la misma. (Flores & Pacompia, 2015)

Ya que la uniformidad del soporte de la sub-rasante es esencial en la función de los pavimentos, esto debe de garantizarse tanto en condiciones secas como húmedas de la sub-rasante. Una adecuada construcción del pavimento de concreto permeable facilita estos requerimientos, específicamente cuando están expuestos al agua de lluvia. Lo que podría provocar la ocurrencia de pérdidas en el soporte de la sub-rasante en suelos arenosos. Sin embargo, el tipo de problemas en un soporte de la sub –rasante es variable y pueden resultar de la presencia de limo y arcilla, los cuales son altamente compresibles, tienen poca cohesión o se expanden en condiciones húmedas. (Flores & Pacompia, 2015)

2.2.3.3.3. Preparación de la Base (Reservorio)

Dependiendo del tipo de suelo, la base debería compactarse entre 90% y 95% de la densidad determinada por AASHTO T-9951 ó AASTHO T-18052. Antes de la colocación del pavimento de concreto permeable tiene una humedad mínima libre y si la sub rasante está en condiciones secas, el tiempo de colocación se acelerará y se reducirá el desempeño del pavimento.

El tiempo de colocación es importante para cumplir con la humedad de la sub rasante sin la presencia de la resistencia libre del agua como en los métodos del pavimento de concreto convencional.

Es esencial una base uniforme y bien preparada al nivel correcto para la construcción de un pavimento de calidad. Los 15 cm de la parte superior de la base deben estar compuestos de material granular con abundante contenido de grava y una cantidad moderada de finos (10%). La base no debe estar irregular, lodosa, saturada, o congelada cuando empieza la colocación. Los suelos de la sub-rasante deben ser humedecidos antes de la colocación del concreto. El descuido en proporcionar una capa húmeda dará como resultado una reducción en la resistencia del pavimento y puede conducir a una falla prematura del pavimento. Para asegurar la compactación uniforme deben de rastrillarse y recompactarse las deformaciones causadas por las rodadas de los vehículos antes de las operaciones de colocación del concreto.

2.2.3.3.4. Mezclado y transporte

Debido a que el concreto permeable tiene un bajo contenido de agua, se requiere un especial cuidado durante los procesos de mezclado y transporte.

Para producir una mezcla de consistencia adecuada, las proporciones deben ser correctamente ajustadas para la humedad de los agregados. El ingreso de los materiales en la mezcladora debe tener una secuencia tal que minimice los grumos del material de mezcla.

La mezcla de concreto permeable tiende a unirse fuertemente en las aspas del mezclador, por lo que es necesario que éstas se limpien adecuadamente y se inspeccionen. Una mezcla de concreto permeable debe ser descargada completamente una hora después

de que se haya agregado el agua de mezcla. El uso de aditivos retardantes o reductores de agua podrían extender el tiempo de colocación hasta 1 ½” horas o más, provocando que el fraguado inicial de mezcla sea más tardío cuando se manejen grandes tiempos en la colocación.

Si estas recomendaciones se siguen, después de una carga de concreto se deberá realizar una inspección visual para garantizar la adecuada consistencia y la relación agua/cemento (a/c).

Un ambiente con alta temperatura provocará un efecto directo en el fraguado inicial por lo que se deberá tener cierto cuidado. De acuerdo a la práctica, el concreto permeable no recomienda para bombeo dado que no es práctico ni factible.

2.2.3.3.5. Colocación

Los procedimientos de colocación adecuados son muy importantes porque conducen a un buen desempeño del pavimento permeable. También es necesario que se cuente con mano de obra experimentada en este campo.

Una disposición bien planeada del proyecto puede facilitar las operaciones de construcción, permitir el uso eficiente de equipo de colocación. Debe de haber disponible un plano que muestre la localización de todas las juntas y la secuencia de colocación antes de empezar la construcción. Deben establecerse las localizaciones de objetos fijos teniendo en mente el patrón de juntas y los métodos de construcción.

Antes de la colocación, la base o reservorio deberá ser completada de acuerdo a las especificaciones establecidas. Toda la mezcla permeable tiene un contenido mínimo libre de humedad. Si la base no tiene el contenido de agua adecuado, esta capa puede absorber agua de la mezcla, acelerando el fraguado y provocando una reducción en la resistencia del pavimento.

Previo a la colocación de la mezcla, deben ser revisadas tanto el encofrado como la nivelación como en el caso de un concreto convencional. Se volverá a compactar la base para dar un espesor y soporte uniforme. Antes de iniciar la descarga, se realizará una inspección visual a la mezcla la cual debe estar hecha de acuerdo con la relación agua-cemento óptima y la superficie de la mezcla deberá tener un aspecto metálico – brillante (Torres, 2010)

El concreto debe ser depositado tan cerca de su nivel final como sea práctico. Esto comúnmente se logra por la descarga directa de la canaleta del camión mezcladora directamente en la subrasante o base como se muestra en la figura 20



Figura 20: Colocación del concreto permeable por medio de un camión mezclador con descarga por atrás (Torres, 2009)

Para la colocación en lugares que no puedan alcanzarse con las mezcladoras, o en donde tenga que minimizarse la alteración de la subrasante o base, puede usarse una banda transportadora. Puesto que las mezclas de concreto permeable normalmente son ásperas (cero revenimientos) no se recomienda el bombeo. Después de depositar el concreto, debe ser acomodado a una elevación aproximada con un rastrillo o con una herramienta manual similar, como se muestra en la figura 21.

El concreto permeable a lo largo del encofrado debe ser compactado por apisonamiento manual para asegurar que las orillas mantengan la integridad estructural después de que los encofrados sean removidos y el concreto sea puesto en servicio. Durante la

compactación del concreto, el borde exterior del pisón debe mantenerse sobre el encofrado para asegurar que el concreto no sea compactado por debajo del nivel del encofrado.



Figura 21: Rastrillado del concreto permeable a una elevación aproximada.

En general, se debe tener mucho cuidado en minimizar:

- Arrastrar o palear el concreto fresco a su posición final;
- El llenado de los huecos en el concreto.
- La contaminación del concreto permeable con material dañino;
- Caminar sobre el concreto permeable fresco.

La colocación del concreto permeable necesita ser completada tan rápidamente como sea posible. El concreto permeable tiene un ligero exceso de agua en la mezcla. El tiempo en que se permita que el material fresco esté expuesto a los elementos es un tiempo en el que se está perdiendo el agua necesaria para el curado. El secado de la pasta de cemento puede llevar a una falla por desmoronamiento en los bordes de la superficie del pavimento. Todas las operaciones y el equipo de colocación deben ser diseñados y seleccionados teniendo esto en mente y programadas para la colocación rápida y el curado inmediato del pavimento.

2.2.3.3.6. Encofrados

Los encofrados pueden ser hechos de madera, plástico, o acero, y deben de tener el mismo espesor del pavimento. Los encofrados deben ser lo suficientemente resistentes y estables para soportar el

equipo mecánico sin tener alguna deformación, desarrollando las operaciones de compactación y esparcimiento, como se muestra en la figura 22 Las subrasantes por debajo de los encofrados debe ser compactada de acuerdo con las recomendaciones del diseñador y niveladas, deberá soportar el equipo de rodillo y enrasadores usados.



Figura 22: El encofrado deberá tener el espesor del pavimento, además de ser lo suficientemente resistentes y estables (<http://www.pervious.com/images/unh.JPG>).

Deben usarse suficientes clavijas y estacas para resistir el movimiento tal como se muestra en la figura 23. Todos los encofrados deben ser limpiados y aceitados según sea necesario.



Figura 23: Encofrado de madera sujeta a base de clavijas

2.2.3.3.7. Equipo enrasado

Los métodos de enrasado varían dependiendo del tamaño del colado. Para trabajos pequeños, tales como caminos particulares, o para áreas estrechas, es aceptable el uso de reglas rectas manuales.

Para trabajos más grandes, se recomienda el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo “A”, como se muestra en la figura 24. Es importante enrasar el concreto tan rápidamente como sea posible, así pues, no se recomienda el trabajo manual si la obra es muy grande debido a la insuficiente velocidad.



Figura 24: Enrasado del concreto permeable mediante el uso de una enrasadora vibratoria de marco con sección tipo “A” (www.perviousconcrete.com).

2.2.3.3.8. Compactación

La compactación del concreto permeable se realiza por medio de un rodillo, a fin de crear una fuerte adherencia de la pasta de cemento entre las partículas del agregado y para proveer una un alisado aceptable de la superficie, como se muestra en la figura 25.



Figura 25: Compactación del concreto permeable mediante el uso de un rodillo (Flores & Pacompia, 2015)

El rodillo debe ser de un ancho adecuado para desplazarse sobre los encofrados y debe de proporcionar una presión vertical mínima de 0.7 k/cm² (ACI522, 2006).

El rodillo normal del tamaño necesario para cubrir una franja de 3.7m que pesa aproximadamente entre 270 a 320 kg. Puede usarse un rodillo para jardinería más pequeño o una herramienta de rodillo construida a pedido especial en pareas estrechas y para áreas más pequeñas, como muestra en la figura 26. No se recomienda los rodillos para jardinería para colados más grande debido al largo tiempo de rodillado necesario y que puede conducir a fallas por desmoramiento en las orillas.

El paso del rodillo debe terminar no más allá de 20 min después de la vibración de impactos. Debido a la textura abierta de la mezcla, la pérdida de humedad se produce a gran velocidad y el inicio del fraguado es muy rápido. Si el concreto ha fraguado, el rodillo no compactará al nivel deseado. Además, un rodillado tardío produce agrietamiento superficial del mortero incrementa la posibilidad de aparición futura de fallas. Usualmente no es necesario realizar operaciones de terminación después de la compactación, no siendo recomendables operaciones de pulido, pues puede obstruir o sellar los poros de la superficie disminuyendo su permeabilidad. No obstante, debe corregirse cualquier defecto superficial inmediatamente en forma manual.

En algunos casos se requiere de esfuerzo adicional para asegurar un pavimento de calidad. En áreas en donde la calidad de rodamiento es un requisito especial, el pavimento debe ser rodillado en cruz para emparejar cualquier desviación vertical en la elevación de la superficie. Junto a las aceras y en los bordes de pavimento expuesto, el concreto debe ser acabado con herramienta adecuada para proporcionar una esquina lisa y suave. Después del enrasado,

la compactación y el canteado, no debe de realizarse ninguna otra operación de acabado.



Figura 26: Rodillo pequeño usado para compactar un área pavimentada pequeña

(http://www.perviousconcrete.com/images/build07/cert_pervious_roller.gif)

2.2.3.3.9. Juntas

Las juntas requeridas en los pavimentos porosos (permeables) difieren a las convencionales. Debido a que en el pavimento poroso tiene menos de un tercio de la retracción de un concreto convencional. Las juntas de contracción se colocan en intervalos de 6m. Deben de tener una profundidad de $\frac{1}{3}$ a $\frac{1}{4}$ del espesor del pavimento. En este caso, los equipos convencionales no son aplicables, debiendo utilizarse un rodillo especial con una hoja filosa. La experiencia ha mostrado que las juntas de dilatación térmica no son necesarias en estos pavimentos (Flores & Pacompia, 2015)

Las juntas longitudinales se colocan en el punto medio del ancho del carril si la construcción del ancho del carril excede los 4.50 m. Las juntas pueden ser construidas en el concreto fresco, con herramientas adecuadas o una sierra cortadora, después de que el concreto se haya endurecido. Sin embargo, las juntas hechas con herramientas adecuadas producen los mejores resultados. No se pueden usar herramientas para construir las juntas del concreto convencional. Puede usarse un rodillo especialmente diseñado con

una hoja que sea, al menos $\frac{1}{4}$ (preferentemente $\frac{1}{3}$) del espesor de la losa y con el suficiente peso para forzar a que la hoja corte limpiamente la junta, como se muestra en figura 27. En situaciones con carriles muy anchos, puede cortarse una junta longitudinal con el rodillo de compactación.

Si se corta con sierra, el procedimiento debe empezar tan pronto como el pavimento se haya endurecido lo suficientemente para evitar daño a la superficie. Si no se usan sierras con sistemas de aspiradoras para recoger el polvo, después del aserrado, las áreas expuestas deben ser lavadas con agua, con lo cual se limpiarán los poros de los finos generados por el aserrado y se asegurará que haya suficiente presencia de agua para el curado apropiado. Es importante recubrir inmediatamente el área expuesta con el material de plástico de curado tan pronto como se hayan hecho los cortes con sierra.



Figura 27: Construcción de una junta mediante la adaptación de una hoja en el rodillo de compacta

Las juntas transversales de construcción sólo pueden ser instaladas, siempre que se haya terminado el tramo de construcción, de otra manera el concreto nunca empezará a endurecer. Para garantizar el vínculo de los agregados con la construcción de las juntas, se debe tener un adecuado agente de adherencia para colocar el concreto

fresco al ya existente, el cual será cepillado o esparcido al límite de la superficie del pavimento existente.

La experiencia muestra que las juntas longitudinales son más susceptibles a desconche. Una compactación adicional en esta zona es necesaria para evitar la aparición de estas fallas.

2.2.3.3.10. Curado

El curado es uno de los elementos fundamentales para obtener un pavimento con las condiciones deseadas. La estructura porosa del concreto hace que el curado sea particularmente importante, ya que el secado puede ocurrir más rápidamente. Este proceso requiere una mayor atención y cuidado que k que se tiene en los pavimentos de concreto convencional, debido a la gran superficie de contacto del concreto con el ambiente. Un proceso erróneo de curado en los primeros 7 días puede reducir la durabilidad de la superficie en un 60% (ACI 522,2006). El proceso de curado debe comenzar inmediatamente después de compactar y producir las juntas transversales.

El procedimiento de curado normalmente utilizado es el de cubrir la superficie expuesta con un material de polietileno claro de 0.15 mm o más grueso, en la dimensión suficiente para que pueda cubrir el ancho completo de un carril a lo largo de una distancia razonable, como se muestra en la figura 28 Los materiales tejidos, tales como yute o una tela geotextil, no deben usarse, ya que no retendrán la humedad en el concreto. Los componentes de curado a base de cera no producen resultados aceptables.

Las operaciones de enrasado, compactación y curado deben realizarse en una secuencia continúa como sea posible para evitar el secado de la superficie exterior del concreto permeable. Después del proceso de colocación, tan pronto como la operación de enrasado culmine, deben empezar las operaciones de compactación.

El recubrimiento con hojas de polietileno debe traslaparse en todas las superficies expuestas de modo que pueda quedar fijo en el lugar. Pueden usarse varillas de refuerzo, madera, o bloques de concreto para fijar el recubrimiento de polietileno, a fin de evitar que sea levantado por el viento. No deben usarse tierra, arena u otro material granular, ya que puede ser lavado, o penetrar en los poros del concreto al momento de la remoción. La hoja debe ser jalada y estirada tanto como sea posible para eliminar los pliegues y minimizar la posibilidad de decoloración o de manchas rayadas en el concreto. Todas las orillas del pavimento deben ser cubiertas apropiadamente. Si no se hace esto, puede dar como resultado desmoronamiento en los bordes expuestos. (Flores & Pacompia, 2015)



Figura 28: Material de polietileno utilizado para cubrir la superficie expuesta del concreto permeable.

Para el curado apropiado, generalmente el pavimento debe permanecer cubierto durante 7 días para mezclas de concreto simple, y 10 días para mezclas que incorporan materiales cementantes suplementarios. Debe pintarse el señalamiento de piso hasta después de que ya terminado el periodo de curado. No debe permitirse el tránsito sobre el pavimento durante el curado.

2.2.3.3.11. Protección en clima frío

Deben tomarse las medias apropiadas en clima frío para proteger al concreto permeable contra el congelamiento, al mismo tiempo que se mantiene la humedad por el tiempo necesario para lograr las propiedades físicas deseadas. Las láminas de curado son lo suficientemente eficaces para servir ambos propósitos.

2.2.3.3.12. Protección en clima caliente

En el clima cálido, el transporte, la colocación y la compactación deben hacerse tan rápidamente como sea posible. Puede aplicarse un retardador de evaporación a la superficie del concreto después del proceso de enrasado para retardar la pérdida de humedad en la superficie. Después de la compactación y antes de la colocación del polietileno, la superficie puede mejorarse ligeramente por neblina o con un retardador de evaporación cuando la superficie perezca estar perdiendo su apariencia brillante.

2.2.3.3.13. Reparación de pavimento de concreto permeable

a) Desbastado

Los puntos altos pueden ser rebajados con un desbastador pesado. Sin embargo, éste cortará y expondrá el agregado en áreas desbastadas, cambiando la apariencia del pavimento.

b) Depresiones o puntos bajos

Las depresiones pequeñas (puntos bajos) deben ser resanadas con una mezcla epóxica con agregado. Para igualar la apariencia de la superficie del pavimento, el agregado deber ser recubierto de cemento mojado y curado antes del resane. Las depresiones grandes deben ser resanadas con un concreto permeable de las mismas proporciones de la mezcla utilizada.

c) Cortes para instalaciones de servicio

En el caso de que una sección del concreto permeable sea cortada, debe llevarse a cabo la reparación con toda propiedad. Esto incluiría remover una sección cuadrada con el ancho de una franja colocada de tal modo que el material nuevo sea lo suficientemente grande para mantener su integridad estructural bajo carga.

2.2.3.3.14. Mantenimiento

Uno de los inconvenientes que pueden presentar en los pavimentos permeables es que necesitan un mantenimiento desde la construcción que evite la llegada de sedimentos a la superficie, pues éstos pueden obstruir sus poros.

Existen dos métodos de mantenimiento que generalmente se usan: el método de lavado a presión y el uso de una aspiradora. El lavado a presión empuja con fuerza los contaminantes a través de la superficie del pavimento. Esto es efectivo, pero debe tenerse cuidado de no usar demasiada presión, ya que esto dañará el concreto permeable. Debe lavarse a presión una sección pequeña de pavimento usando varias presiones de agua para determinar la presión apropiada para el pavimento dado. El uso de una aspiradora eléctrica potente remueve los contaminantes, extrayéndolos de los huecos del pavimento. El sistema más efectivo, sin embargo, es el de combinar las dos técnicas y aspirar después del lavado o presión. Para realizar estas operaciones de limpieza, varios son los modelos de máquinas que se utilizan, centrándose la mayor parte en máquinas autopropulsadas con un equipo de lavado-succión trasero con agua, de alta potencia y ancho de 2.5 metros, como se muestra en la figura 29. El agua es, en un gran porcentaje, recuperada y filtrada para continuar siendo utilizada en el proceso. (Castro, 2011)

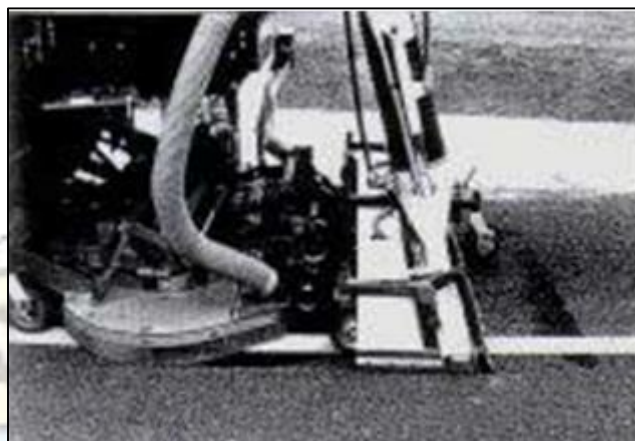


Figura 29: Máquina autopropulsada de limpieza con sistema presión-aspiración.

En la relación a la periodicidad con que debe realizarse la limpieza, parece razonable hacerlo una vez al año y después de las lluvias prolongadas, que hayan podido ablandar al máximo la suciedad depositada y así alcanzar los mejores resultados con el menor esfuerzo. En la tabla 18 se muestran algunas actividades de mantenimiento para el concreto permeable.

Tabla 19: Actividades típicas de mantenimiento para el concreto permeable (ACI 522, 2006)

ACTIVIDAD	PROGRAMA
- Asegurarse de que no haya tierra sobre el pavimento. - Asegurarse de que el área esté limpia de sedimentos.	Mensualmente
- Sembrar vegetación en el área d aguas arriba. - Limpiar con aspiradora para mantener la superficie libre de sedimentos.	Como sea necesario
- Inspeccionar la superficie para localizar los deterioros o astillamientos.	Anualmente

Fuente: ACI 522, 2006

2.2.3.3.15. Mantenimiento

Al igual que con cualquier material ingenieril, es importante verificar la calidad de un pavimento de concreto permeable. Se realizan pruebas de la condición de la subrasante o base para asegurar el

grado de compactación, el valor de soporte y la permeabilidad adecuados. Las pruebas de la mezcla deben ser realizadas con el objeto de investigar las propiedades del concreto tanto fresco como endurecido para el aseguramiento de la calidad del peso volumétrico, el espesor y el volumen de huecos. Mucho de los métodos de prueba actuales de la ASTM Y AASHTO son aplicables a la construcción de pavimento de concreto permeable; sin embargo, debido a las características físicas del material, no todas las pruebas del concreto simple son apropiadas para el concreto permeable.

a) Supervisión previa a la construcción

La determinación de la permeabilidad de la base y el análisis del suelo son particularmente importantes en el diseño y construcción de un proyecto. Las pruebas básicas de las propiedades de la base deben incluir un análisis Granulométrico (ASTM D422), clasificación del suelo (ASTM D2487) y peso volumétrico obtenido en pruebas Próctor estándar (ASTM D698). Los resultados de estas pruebas proveerán al diseñador los datos necesarios.

La prueba de infiltración usada para diseñar fosas sépticas no es una prueba apropiada para determinar la permeabilidad de la subrasante para pavimentos permeables. Debe de compactarse una sección de prueba de la subrasante al grado de compactación ya especificado como parte del análisis de suelo antes de completar el diseño del proyecto. Debe de usarse un infiltrómetro de anillo doble (ASTM D3385) u otra prueba apropiada para probar adecuadamente la permeabilidad. Para proyectos pequeños, estas pruebas pueden o no ser necesarias, especialmente si el diseñador tiene experiencia previa con suelos locales similares.

Deben de llevarse a cabo procedimientos de prueba normales para control (compactación) de acuerdo con el procedimiento estandarizado de pruebas ASTM sin modificaciones antes de

colocar el concreto, como parte de un plan normal de control de calidad.

b) Supervisión y pruebas durante la construcción

Debido a las características de la mezcla de concreto, pueden no ser apropiados los métodos de prueba estandarizados para el control del peso volumétrico, la relación de huecos, rendimiento, filtración, y otras propiedades de los pavimentos de concreto permeables. Mientras no se tengan nuevos métodos de prueba que estén completamente desarrollados, las especificaciones del proyecto deben estar basadas en proporciones de mezcla específicas para concreto permeable. Las especificaciones generalmente requieren contenidos mínimos de cementantes, volúmenes de agregado y granulometría, aditivos y agua.

Los criterios de aceptación deben tener dos aspectos distintos. El primer criterio se basa en la mezcla de cemento Portland tal como es entregada y se basan en el peso volumétrico. Para el colocado de cada día, o cuando una inspección visual indique un cambio en la apariencia del concreto fresco, debe realizarse al menos una prueba para verificar el peso volumétrico del material. La prueba de la mezcla debe realizarse de acuerdo con el ASTM C172. La aceptación debe ser sobre un valor de $\pm 80 \text{ kg/cm}^3$ del peso volumétrico de diseño. El segundo criterio se bosqueja en la siguiente sección. (Flores & Pacompia, 2015)

c) Supervisión y pruebas posteriores a la construcción

El segundo criterio de aceptación está basado en el pavimento terminado. El grado de compactación de mezcla fresca puede tener un impacto en la vida y la permeabilidad del producto terminado. La obtención de tres muestras de núcleo del pavimento dará como resultado muestras de aceptación para el espesor, el contenido de huecos, y el peso volumétrico. Los corazones deben obtenerse de acuerdo con el ASTM C42 y ser

probados en una edad de 28 días. No existen todavía métodos de prueba estandarizados para determinar el peso volumétrico. Además, la supervisión visual de la muestra tomará en cuenta la verificación del volumen necesario de huecos abiertos para facilitar el drenaje. Una supervisión visual que muestre una estructura de poros completamente cerrada o severamente restringida puede indicar un pavimento que no funcionará apropiadamente, y esas secciones que se hayan demostrado que son esencialmente impermeables deben ser removidas y reemplazadas. Debe de lograrse un acuerdo sobre qué es esencialmente lo impermeable y sobre el método de medición antes de iniciar la colocación.

Se están desarrollando pruebas para determinar la permeabilidad en el sitio de los pavimentos. Adicionalmente, los métodos de prueba que están siendo desarrollados para pavimentos de asfalto pueden también servir para concreto permeable.

En ningún momento la aceptación debe basarse en la resistencia a compresión del concreto permeable, ya sea como es entregado, o tal como es muestreado por núcleos del pavimento. Debido a la relación entre la compactación y la resistencia a la compresión, existe un amplio rango de resistencias que pueden ser generadas desde una simple entrega de concreto permeable. Adicionalmente, todavía no hay métodos de prueba estándar para probar la resistencia a compresión del concreto permeable. La experiencia local con material a través de proyectos terminados, secciones de prueba, o ambos, debe dar una indicación respecto a si una proporción de mezcla específica tendrá la resistencia suficiente para soportar los esfuerzos de las cargas del tránsito de diseño.

2.3. Hipótesis

2.3.1. Hipótesis General

El agregado grueso de la cantera del río Ichu influyó favorablemente en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - $f'c$ 175kg/cm².

2.3.2. Hipótesis específicas

- La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu mejoró la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².
- La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu incrementó el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².

2.4. Definición de Términos

Barahona, Martínez, & Zelaya (2013, p.42) mencionó que: “El concreto permeable se encuentra dentro del espectro de los materiales ecológicos, ya que permite la filtración del agua al subsuelo. El material es sumamente durable, no degradable e increíblemente resistente manteniendo sus características de permeabilidad”.

A continuación, se presentan términos relacionados con el concreto permeable:

- **Influencia:** Es la manera de medir el comportamiento (conducirse, portarse). Se trata de la forma de proceder de un agente, material ante cualquier variable que lo afecte.
- **Agregados:** Los agregados para concreto pueden ser definidos como aquellos materiales inertes que poseen una resistencia propia suficiente (resistencia del grao), que no perturba ni afecta el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico y que garantiza una adherencia con la pasta de cemento endurecida. Las exigencias químicas, se deben hacer a los agregados, para evitar su reacción en la masa de concreto, es evitar sustancias agresivas y componentes geológicos o mineralógicos.

Tabla 20:Clasificación general del agregado según tamaño

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

Fuente: Elaborado por Torres (2010).

- **Agregado Grueso:** El agregado grueso se compone de partículas con un diámetro superior a 4.75mm.
- **Agregado Fino:** Las partículas que conforman el agregado fino tienen tamaños entre 0.075 y 4.75mm, lo que significa que son partículas que pasan por el tamiz 3/8" y quedan retenidos en el tamiz #200, normalmente es un agregado que funciona como llénate de vacíos de manera que las mezclas adquieren una característica más compacta.
- **Cemento:** El cemento cumple la función de ligante entre los agregados. Esto se debe a las propiedades del cemento Portland que le permite fraguar al reaccionar con el agua, obteniendo propiedades aglutinantes, lo que le permite agrupar los agregados para conformar el concreto.
- **Aditivo:** Según el Comité ACI-212, un aditivo se puede definir como un material distinto del agua, agregado y cemento convencional, que se usa como ingrediente en concreto o morteros y se añade a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado. Hoy en día los aditivos son considerados un ingrediente más del concreto y son empleados para modificar las propiedades de éste, de tal modo que se hagan más adecuados para las condiciones de trabajo o por economía. Los aditivos se pueden clasificar de la siguiente manera

según la influencia que tienen en el concreto cuando este se encuentre en su estado fresco.

Tabla 21. Clasificación de los Aditivos

Aditivo	Clasificación
Reductor de agua	A
Retardante de fraguado	B
Acelerante de fraguado	C
Reductor de agua y retardador	D
Reductor de agua y acelerante	E
Reductor de agua de alto rango	F
Reductor de agua de alto rango y retardante	G

Fuente: Elaborado por Torres (2010).

- **Concreto Permeable:** El concreto permeable a diferencia del concreto convencional es fabricado con base en agregado grueso, cemento, agua y aditivos, y en algunos casos la mezcla es realizada con poco o nada de arena. Este tipo de mezcla una vez es fundida drena con rapidez por la gran cantidad de poros y/o vacíos que se conectan formando vías de escape para líquidos como agua.
- **Contenido De Vacíos:** Masa volumétrica (masa unitaria) y vacíos: La masa unitaria es el peso o masa de agregado que se necesita para llenar un recipiente con un volumen determinado. El volumen referido aquí es el ocupado por los agregados y el volumen de vacíos que ocupan todo el recipiente. La masa volumétrica que ocupa los agregados comúnmente usados varía entre los 1200 a 1750 kg/m³. La cantidad de vacíos afecta la demanda de pasta que necesita la mezcla. La demanda de agua de mezcla y cemento aumenta con la cantidad de vacíos. Así como la cantidad de vacíos varía cerca de 30% a 45% para el agregado grueso y cerca del 40% al 50% para el agregado fino. Se debe tener en cuenta que la angularidad de un agregado aumenta la cantidad de vacíos

- **Porosidad:** Es la capacidad de un material de absorber líquidos o gases. También es el tamaño y número de los poros de un filtro o de una membrana semipermeable.
- **Concreto Endurecido:** El concreto se encuentra en este estado cuando propiamente comienza la formación del tejido filamentosos producto de la hidratación, o gel de cemento, que endurece la pasta y que a su vez la capacita para aglutinar las partículas de los agregados, dándole resistencia mecánica a la masa del concreto.
- **Concreto Fresco:** Mezcla de concreto recién elaborada, la cual es una masa plástica que puede ser moldeada con relativa facilidad, y que a temperatura normal de prueba permanece en ese estado durante pocas horas. Inicia desde que el concreto está recién mezclado, hasta el principio de la rigidez del mismo.
- **Curado:** Procedimiento para mantener en el concreto, los contenidos de humedad y temperatura en condiciones satisfactorias, durante un período definido inmediatamente después de la colocación y acabado, con el propósito que se desarrollen las propiedades deseadas.
- **Mezclado:** Es la incorporación de los componentes del concreto hasta el grado en que las reacciones entre sí se completen; esta puede llevarse a cabo mediante medios manuales o mecánicos.
- **Relación Agua-Cemento (A/C):** La razón de la cantidad de agua, excluyendo sólo aquella absorbida por los agregados, a la cantidad de cemento en la mezcla de concreto o de mortero; establecida de preferencia como un decimal por peso.
- **Trabajabilidad:** Es la propiedad que determina el esfuerzo necesario para manipular, una cantidad de mezcla fresca de concreto con la mínima pérdida de homogeneidad.
- **Vacío de Aire:** Es un espacio, en la pasta del cemento, mortero o concreto, lleno de aire; un vacío de aire atrapado mide más o menos 1 mm de ancho, y es de forma irregular; estos tienen un diámetro entre 10 y 1000 ppm y asemeja una esfera
- **Pavimentos:** Forman parte del firme y es la capa que está constituida por uno o más materiales que se colocan sobre el terreno natural o nivelado, para

aumentar su resistencia y servir para la circulación de personas o vehículos. Entre los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial están los suelos con mayor capacidad de soporte, los materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas.

- **Pavimentos de Bajo Tránsito:** Pavimento que se construye con la finalidad de brindar condiciones de circulación cómoda, segura y económica al tránsito que lo habrá de utilizar. En consecuencia, su diseño implica la estimación del número y características de los vehículos que puedan circular sobre él.
- **ACI:** Es una sociedad técnica y educativa dedicada a mejorar el diseño, construcción, mantenimiento y reparación de estructuras de hormigón.
- **ASTM:** Siglas que corresponden a la entidad AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (Sociedad americana para pruebas y materiales).

2.5. Identificación de Variables

Variable Independiente:

- Agregado grueso

Variable Dependiente:

- Propiedades del concreto permeable

2.6. Definición Operativa de Variables e Indicadores

La variable estudiada es la granulometría más óptima de agregado grueso para la obtención de un diseño de mezcla de concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm², el cual incidirá en las características de la resistencia a la compresión y coeficiente de permeabilidad.

Tabla 22 Variables de Estudio

	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	FACTOR A MEDIR
INDEPENDIENTE	Agregado Grueso	Granulometría	- Tamaño máximo - Módulo de finura - Contenido de humedad - Absorción - Peso específico - Abrasión	Gradación del agregado grueso
	Diseño óptimo de mezcla de concreto	Resistencia a la compresión	- Ensayo de compresión del concreto (ASTM C 39).	Resistencia la compresión a los 28 días
DEPENDIENTE	permeable	Coefficiente de permeabilidad	- Ensayo de permeabilidad, ACI 522R-10 y ASTM-C09.49	Coefficiente de permeabilidad

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. **Ámbito de estudio**

Los sectores de estudio pertenecen a la cantera del río Ichu específicamente en el lugar de Callqui Chico, donde se llevará a cabo los trabajos de obtención de muestra del agregado grueso y también se desarrollará en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Huancavelica, que se encuentra ubicados en el distrito de Huancavelica, provincia y región Huancavelica, a una altitud de 3650 msnm.

3.2. **Tipo de Investigación**

El tipo de investigación fue **APLICADA**: según **Sánchez & Reyes, (1996, pág. 13)**, este tipo de investigación “Llamada también constructiva, se caracteriza por su interés en la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y las consecuencias prácticas que de ella se deriven”.

3.3. **Nivel de Investigación**

El nivel de investigación fue **EXPLICATIVO**: Según **Gonzales, Oseda, Ramirez, & Gave (2011, pág.142)**, se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido, los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas, como de los efectos, mediante la prueba de hipótesis.

3.4. **Método de Investigación**

Como método de investigación se tiene como método general al método científico y método específico al método experimental la cual se detalla a continuación:

Método general

En la presente investigación como método general se usará al método científico. Según Sánchez & Reyes (1996), el método científico es la manera sistematizada en que se efectúa el pensamiento reflexivo que nos permite llevar a cabo un proceso de investigación científica (p.25).

Método específico

El método de investigación es experimental porque de acuerdo a un plan previo se organizará para proceder con la investigación de las posibles causas-efecto, según Sánchez & Reyes, (1996).

3.5. Diseño de Investigación

El diseño de investigación será: Pre Experimental, de particular el diseño de un grupo solo después: “En este diseño un tratamiento es aplicable a un grupo, luego se hace una observación o medición O en los sujetos que componen un grupo, con la finalidad de evaluar los efectos del tratamiento (variable experimental o independiente)” Sánchez & Reyes (2009) págs. 86-87.

GE: X O

Dónde:

G.E. Grupo Experimental

X: Agregado grueso de la Cantera del río Ichu

- X₁: 3/8"
- X₂: 1/2"
- X₃: 3/4"

O: Concreto permeable:

- N° de Prueba de Resistencia a la Compresión (f'c): 24 cilindros (ASTM C-39).
- N° de Prueba de Infiltración (μ): 15 cilindros (Según ACI 522 R – (06-10) y ACI 211R - 02).

3.6. Población, Muestra, Muestreo

3.6.1. Población

La investigación tendrá una población de selección de una muestra representativa del agregado grueso de la cantera de río Ichu de manera aleatoria, para evaluar sus características (pruebas de laboratorio), con los cuales se realizarán diseños de mezcla par el concreto permeable.

- 24 Probetas cilíndricas de dimensiones de 15cm de diámetro y 30 cm de alto.

3.6.2. Muestra

La muestra que se toma de la población es no probabilística de carácter intencional, que a continuación se menciona:

- 24 Probetas cilíndricas de dimensiones de 15cm de diámetro y 30 cm de alto.

3.6.3. Muestreo

Para seleccionar la muestra se usó el tipo de muestreo no probabilístico de carácter intencional.

3.7. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.7.1. Técnicas

Las principales técnicas que se utilizara en esta investigación serán:

- ✓ La observación directa e indirecta: Se registrará los esfuerzos de compresión y permeabilidad de las probetas.
- ✓ El análisis documental: Se realizará de forma analítica e interpretativa la información que está a nuestro alcance para extraer lo necesario.
- ✓ Se seguirá las técnicas indicadas en el ASTM American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y materiales), NTP (Normas Técnicas Peruanas) y el método ACI (American Concrete Institute).
 - Contenido de humedad para Agregados: EM 2000, MTC E 108- 2000, basado en la norma ASTM D2216

- Peso específico y absorción de Agregado fino: EM 2000, MTC E 205 -2000, basado en la norma ASTM C128.
- Peso específico y absorción de Agregado Grueso: EM 2000, MTC E 206 -2000, basado en la norma ASTM C127.
- Peso unitario de los agregados (suelto y compactado): Peso específico y absorción de Agregado fino: EM 2000, MTC E 203 -2000, basado en la norma ASTM C29.
- Análisis granulométrico para Agregado fino, grueso y global: EM 2000, MTC E 204 -2000, basado en la norma ASTM C136.
- Abrasión los Ángeles (L.A) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”), basado en la norma ASTM C131.
- Diseño de mezcla de Concreto Permeable: Guía para la selección de proporciones para concretos con cero Slump (ACI 211.3R) y el procedimiento de diseño que brinda el Reporte en Concreto Permeable (ACI 522R-10)
- Densidad y contenido de vacíos de mezclas frescas de concreto permeable: ASTM C1688.
- Prueba de revenimiento o Slump: ASTM C143-00.
- Ensayo de cono invertido: ASTM C-09.49,2011.
- Resistencia a compresión del concreto en muestras cilíndricas: ACI 522R-10.
- Permeabilidad: ACI 522R-10.

3.7.2. Instrumentos

Los instrumentos y equipos que se usará en la investigación para la recolección de datos son:

- Equipo para esfuerzo de compresión de testigos y unidades de albañilería.
- Permeámetro elaborado por los tesisas de acuerdo a la norma ACI 522R-10.
- Balanza calibrada.
- Cuaderno de datos.
- Fichas técnicas de observación y control de laboratorio.

- Fichas de ensayos.
- Fichas de resúmenes textuales, comentarios bibliográficos, etc.

3.8. Procedimiento de recolección de datos

Para la recolección de datos se realizará a través de los siguientes trabajos:

- Elaboración de un plan de trabajo de laboratorio.
- Disposición de herramientas para la recolección del agregado grueso de la cantera del río Ichu (Callqui Chico)
- Ensayos en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil.
- Disposición de equipos, herramientas y materiales para la caracterización de los componentes del concreto (agregados fino y grueso, cemento y agua).
- Elaboración del diseño de mezcla de concreto permeable para un $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$.
- Disposición de equipos y herramientas para la elaboración de probetas cilíndricas.
- Elaboración de 24 probetas cilíndricas con diferente tamaño de agregado grueso: $3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$.
- Ensayo de Densidad y porcentaje de vacíos en estado fresco del concreto permeable.
- Ensayos de resistencia a compresión de las 24 probetas cilíndricas.
- Ensayo de Densidad y porcentaje de vacíos en estado endurecido del concreto permeable.
- Ensayos de permeabilidad de 15 probetas cilíndricas.
- Procesamiento los datos obtenidos a través del ensayo de resistencia a compresión y ensayo de permeabilidad.

3.9. Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos

3.9.1. Estadísticos Descriptivos o Cuantitativos

Para el procesamiento de datos se hará mediante el uso de la estadística descriptiva empleando: porcentajes, medias aritméticas, mediana, coeficiente de variación y desviación estándar.

3.9.2. Estadísticos Inferenciales

Para la contrastación de datos se trabajó con el ANOVA de un factor (Análisis de varianza) con DCA (Diseño Completamente Aleatorio) con la prueba "F" de Fisher para medir la homogeneidad de los grupos con las fases que implica su proceso, y la prueba estadística de Tukey para los intervalos de confianza de las medias con un 5% de nivel de significancia.

3.9.3. Presentación de Datos

Para la presentación de datos se hará a través de:

- ✓ Estadísticas descriptivas para cada una de las variables.
- ✓ Frecuencias y porcentajes.
- ✓ Se utilizará tablas, histogramas de frecuencias, gráficos de líneas, interpretados estadísticamente que permitan visualizar los resultados del proyecto.
- ✓ Cuadros comparativos para visualizar la incidencia de la variable independiente sobre la dependiente de acuerdo a normas establecidas.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Presentación de Resultados

La presente investigación consiste en un estudio experimental la cual se compone de 4 etapas como se aprecie en la siguiente figura:

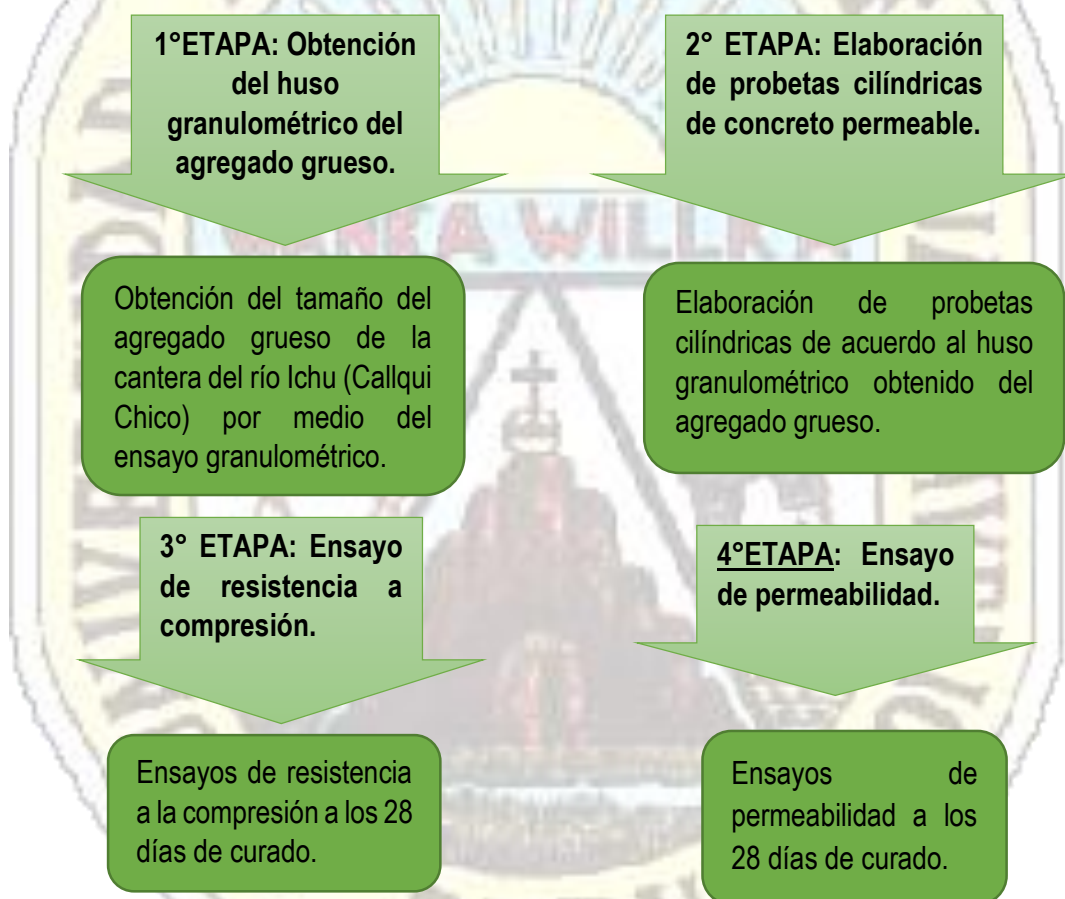


Figura 30 Etapas del proceso de ejecución de la presente investigación

4.1.1. Obtención del huso granulométrico del agregado grueso.

Para la elaboración del concreto permeable de la presente investigación se utilizaron materiales que componen el concreto permeable con los diferentes

husos granulométricos obtenidos del ensayo granulométrico practicado a los agregados extraídos de la cantera del rio Ichu.

4.1.1.1. Extracción de los Agregados

Los agregados utilizados durante la ejecución del presente trabajo, fueron extraídos de la cantera Callqui Chico proveniente del rio Ichu, se optó por esta cantera porque estos agregados son los más utilizados durante la ejecución de obras civiles en la ciudad de Huancavelica, por ser accesibles, cercanos y de buena calidad.

Los agregados en su mayoría son de origen sedimentario, donde la acción erosiva de las aguas pluviales, la fuerza hidráulica y el acarreo de estos minerales, nos proporcionan un agregado de forma redondeada, denominados cantos rodados.

CANTERA CALLQUI CHICO: La ubicación de la cantera permite conocer la accesibilidad al material, así como la influencia en el mercado, y su aplicación en la ciudad de Huancavelica y sus características son las siguientes:

Ubicación: Av. Libertadores N°26, Centro Poblado de Callqui Chico – Huancavelica – Huancavelica – Huancavelica

Acceso: Lado izquierdo del río Ichu.

Propietario: CENTENO DE LA CRUZ, Timoteo

Material: Arena y grava de río.

Tabla 23: Coordenadas UTM de la cantera "Callqui Chico"

COORDENADAS UTM: ZONA 18 South				
Nro.	Nombre	Norte	Este	Altura Geoidal
01	Callqui Chico	8588015	499083	3705

Fuente: Elaboración propia



Figura 31: Vista satelital de la zona de extracción del agregado grueso, proveniente de la cantera del río Ichu denominado "Callqui Chico"

4.1.1.2. Ensayos de laboratorio realizados a los Agregados

Los agregados utilizados durante la ejecución del presente trabajo, fueron extraídos de la cantera Callqui Chico proveniente del río Ichu, se optó por

a) Contenido de Humedad de los Agregados

Este ensayo se realizó de acuerdo al EM 2000, MTC E 108-2000; "METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DE UN SUELO", el cual está basado en la norma ASTM D2216.

Equipo utilizado:

- Balanza con precisión a 0.1% del peso de la muestra ensayadas.
- Taras
- Horno a 105 +/- 5°C

Descripción del proceso:

Tabla 24: Descripción del proceso de elaboración el ensayo de contenido de humedad

			
a) Una vez extraídas las muestras en su estado inicial, se procede a llevar al laboratorio de la UNH, para poder realizar los diferentes ensayos.		b) Se cuartea el material tanto del agregado fino como del grueso, esto con la finalidad de tomar muestras representativas, aproximadamente 250 g, luego se coloca la muestra en envases previamente tarados.	
<u>Agregado Grueso</u>			
			
<u>Agregado Fino</u>			
			
c) Se toman 3 muestras para sacar un promedio para que el ensayo sea más aproximado.			

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$W = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso seco del suelo}} * 100$$

Tabla 25: Contenido de humedad del agregado fino

AGREGADO GRUESO						
MUESTRAS		Und	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A	Peso de Tara	gr	79.90	89.80	152.86	
B	Peso de Tara + Muestra Húmeda	gr	1117.03	982.00	1448.01	
C	Peso de Tara + Muestra Seca	gr	1076.39	946.28	1396.20	
D	Peso de Agua	gr	40.64	35.72	51.81	
E	Peso de Muestra Seca	gr	996.49	856.48	1243.34	
Porcentaje de Absorción = (D / E) x 100		%	4.08	4.17	4.17	4.14

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26: Contenido de humedad del agregado grueso

AGREGADO FINO						
MUESTRAS		Und	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
A	Peso de Tara	gr	20.67	19.78	19.80	
B	Peso de Tara + Muestra Húmeda	gr	112.20	103.14	123.78	
C	Peso de Tara + Muestra Seca	gr	103.47	95.28	113.94	
D	Peso de Agua	gr	8.73	7.86	9.84	
E	Peso de Muestra Seca	gr	82.80	75.50	94.14	
Porcentaje de Absorción = (D / E) x 100		%	10.54	10.41	10.45	10.47

Fuente: Elaboración propia

b) Peso específico y absorción de los agregados finos:

El método de ensayo de gravedad específica o densidad relativa, cubre la determinación de la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado grueso, no incluyendo el volumen de vacíos entre las partículas. Se realizó de acuerdo al EM 2000, MTC E 205-200; PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS, el cual está basado en la norma ASTM C 128.

Equipo utilizado:

- Balanza
- Picnómetro

- Molde cónico (cono de absorción)
- Varilla para apisonado metálica
- Bandejas
- Equipo que proporcione calor a una intensidad moderada (secadora de cabello).

Descripción del proceso

Tabla 27: Descripción del proceso de elaboración el ensayo de peso específico y absorción del agregado fino.

			
a) Se selecciona una muestra de 1 Kg, aproximadamente, considerando que el material pasó la malla N° 4, posteriormente este material se sumerge en el agua por un periodo de 24 horas para lograr su saturación.	b) Una vez saturado, el agua es vaciado cuidadosamente y comienza el proceso de secado, poniendo el material fino en un recipiente metálico y suministrándole calor a través de una secadora, estando pendiente de que este proceso sea homogéneo y constante.		



c) Seguidamente se toma el material y se rellena el tronco de cono cuidadosamente y se apisona sin mayor fuerza con 25 golpes sobre la superficie, se retira el cono y se verificará el primer desmoronamiento lo cual indica el estado saturado superficialmente seco (S.S.S) del agregado, que es el objetivo de esta sección de ensayo.

d) Se toma el material resultante del proceso anterior y se introduce una cantidad adecuada, en el picnómetro previamente tarado y se determina su peso; posteriormente se llena de agua hasta un 90% aproximadamente de su capacidad y se retira el aire atrapado girando el picnómetro y sometiéndolo a baño maría.



- e) Finalmente el picnómetro lleno hasta el total de su capacidad se pesa, se decanta nuevamente el agua y el agregado se retira a una tara para ser secado al horno por 24 horas y se determina también el peso seco de este material.

Cálculos:

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B+S-C}$$

$$\text{Peso del estado saturado superficialmente seco (S.S.S)} = \frac{S}{B+S-C}$$

$$\text{Peso específico nominal} = \frac{A}{B+A-C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{S-C}{A} * 100$$

Dónde:

A: Peso seco de la muestra. (gr.)

B: Peso del frasco + agua. (gr.)

C: Peso del frasco + agua + muestra. (gr.)

S: Peso de la muestra saturada con superficie seca. (gr.)

Tabla 28: Datos del ensayo de peso específico

AGREGADO FINO			
MUESTRAS		Und	Muestra 1
A	Peso de la arena superficialmente seca + Peso del frasco + Peso del agua	gr	960.60
B	Peso de la arena superficialmente seca + Peso del frasco	gr	500.00
C	Peso del Agua	gr	460.60
D	Peso de la arena secada al horno + Peso del frasco	gr	559.10
E	Peso del frasco	gr	79.10
F	Peso de la arena secada al horno	gr	480.00
G	Volumen del frasco	cm3	770.00
H	Peso de la muestra de arena superficialmente seca	gr	500.00
I	Peso del frasco + Agua	gr	660.20

Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Tabla 29: Resultados del peso específico y absorción del agregado fino.

Peso específico y absorción	
Peso específico aparente	2.40 gr/cm3
Peso específico aparente S.S.S	2.51 gr/cm3
Peso específico nominal	2.67 gr/cm3
Absorción	4.17 %

Fuente: Elaboración propia

c) Peso específico y absorción de los agregados gruesos:

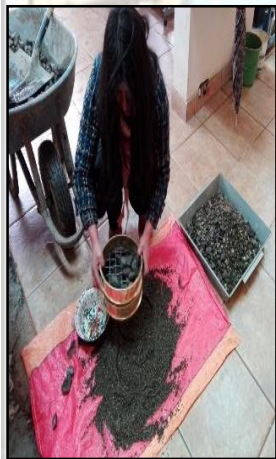
Se realizó de acuerdo al EM 2000, MTC E 206-200; PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS GRUESOS, el cual está basado en la norma ASTM C 127.

Equipo utilizado:

- Horno
- Recipientes
- Balanza
- Probeta graduada

Descripción del proceso

Tabla 30: Descripción del proceso de elaboración el ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso.

			
a) De acuerdo a la tabla 1 del MTC E 206 se obtiene una muestra representativa de 3 kg para un TMN de 1", el cual se satura por 24 horas, en seguida se retira el agregado cuidadosamente y se vierte sobre un paño absorbente	b) Posteriormente para obtener su estado saturado superficialmente seco mediante secado manual, se toma cierto porcentaje de la muestra S.S.S.		



Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{B-C}$$

$$\text{Peso específico aparente (S.S.S)} = \frac{B}{B-C}$$

$$\text{Peso específico nominal} = \frac{A}{A-C}$$

$$\text{Absorción} = \frac{B-A}{A} * 100$$

Dónde:

A: Peso al aire de la muestra seca al horno. (gr.)

B: Peso de la muestra S.S.S (gr.)

C: Peso en el agua de la muestra saturada. (gr.)

Tabla 31: Datos del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso

AGREGADO GRUESO			
MUESTRAS		Und	Muestra 1
A	Peso de la muestras secada al horno	gr	2714.60
B	Peso de la muestra saturada superficialmente seca	gr	2807.60
C	Peso sumergido de la canastilla	gr	890.60
D	Peso de la muestra de la canastilla + Muestra SSS	gr	1605.00
E	Peso sumergido en agua de la muestra saturada	gr	1605.00

Fuente: Elaboración propia

Resultados:

Se muestra a continuación los valores obtenidos del ensayo de gravedad específica y absorción de los agregados de la cantera de Callqui Chico

Tabla 32: Resultados del peso específico y absorción del agregado grueso.

Peso específico y absorción	
Peso específico aparente	2.26 gr/cm ³
Peso específico aparente S.S.S	2.33 gr/cm ³
Peso específico nominal	2.45 gr/cm ³
Absorción	3.43 %

Fuente: Elaboración propia

d) Peso unitario de los agregados:

Este ensayo nos permite conocer el peso unitario del agregado en su condición compactada o suelta y calcular los huecos entre las partículas en una masa de agregado grueso, el tamaño del agregado tiene que estar por debajo de 5 pulgadas (125mm). Se realizó de acuerdo al EM 2000, MTC E 203-200; PESO UNITARIO Y VACÍOS DE LOS AGREGADOS, el cual está basado en la norma ASTM C29.

Equipo utilizado:

- Balanza
- Varilla compactadora
- Recipientes de volúmenes adecuados

Descripción del proceso:

Tabla 33: Descripción del proceso de elaboración del ensayo de peso unitario del agregado fino y grueso.

	
a) Se elige un molde de dimensiones adecuadas, de acuerdo al TMN del agregado, sin embargo, para el ensayo se utilizó un molde de briqueta de 15 cm x 30 cm aproximadamente, por ser el más aproximado a las recomendaciones del ensayo. Se determinan su peso y dimensiones de tal manera que se pueda lograr su volumen.	b) Para determinar el peso unitario compactado por apisonado del agregado se deberá colocar el material en tres capas de igual modelo, de tal manera que colmen el molde; cada capa recibe un total de 25 golpes con el apisonador sin que este choque a la base o altere capas inferiores de agregado, finalmente se enrasa el molde con el mismo apisonador y se pesa el molde más agregado.
Agregado Fino  Agregado Grueso 	

- c) Para determinar el peso unitario suelto del agregado, el procedimiento es similar, más en este caso no se utiliza el apisonador, solo se deja caer la muestra desde una altura no mayor a 2" desde el borde superior con una herramienta adecuada que puede ser una cuchara, se enrasa y pesa como en el caso anterior.
- d) Se pone de conocimiento que el procedimiento es el mismo para el agregado grueso y fino; se usó también el mismo molde y para calcular vacíos en el agregado se usó el dato del peso específico aparente, el cual será hallado en el ensayo gravedad específica y absorción de los agregados gruesos.

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

- Agregado fino

Tabla 34: Peso unitario suelto del agregado fino.

AGREGADO FINO						
MUESTRAS		Und	Molde I	Molde II	Molde III	Promedio
A	Peso del molde	gr	10130.00	10130.00	10130.00	
B	Peso del molde + Muestra	gr	18130.00	18168.00	18210.00	
C	Peso de la Muestra	gr	8000.00	8038.00	8080.00	
D	Volumen del Molde	cm3	6434.88	6434.88	6434.88	
E	Peso Unitario	gr/cm3	1.24	1.25	1.26	1.249
Peso Unitario Suelto		Kg/m3	1243.22	1249.13	1255.66	1,249.34

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35: Peso unitario compactado del agregado fino.

AGREGADO FINO						
MUESTRAS		Und	Molde I	Molde II	Molde III	Promedio
A	Peso del molde	gr	10130.00	10130.00	10130.00	
B	Peso del molde + Muestra	gr	18620.00	18666.00	18761.00	
C	Peso de la Muestra	gr	8490.00	8536.00	8631.00	
D	Volumen del Molde	gr	6434.88	6434.88	6434.88	
E	Peso Unitario	gr/cm3	1.32	1.33	1.34	1.329
Peso Unitario Compactado		Kg/m3	1319.37	1326.52	1341.28	1,329.06

Fuente: Elaboración propia

- Agregado grueso

A continuación, se muestran los valores obtenidos del ensayo de Peso Unitario para el agregado grueso retenido en la malla N° 04.

Tabla 36: Peso unitario suelto del agregado grueso.

AGREGADO GRUESO						
MUESTRAS		Und	Molde I	Molde II	Molde III	Promedio
A	Peso del molde	gr	10130.00	10130.00	10130.00	

B	Peso del molde + Muestra	gr	18521.00	18520.00	18595.00	
C	Peso de la Muestra	gr	8391.00	8390.00	8465.00	
D	Volumen del Molde	gr	6434.88	6434.88	6434.88	
E	Peso Unitario	gr/cm3	1.30	1.30	1.32	1.308
	Peso Unitario Suelto	Kg/m3	1303.99	1303.83	1315.49	1,307.77

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37: Peso unitario compactado del agregado grueso

AGREGADO GRUESO						
MUESTRAS		Und	Molde I	Molde II	Molde III	Promedio
A	Peso del molde	gr	10130.00	10130.00	10130.00	
B	Peso del molde + Muestra	gr	18872.00	18767.00	18900.00	
C	Peso de la Muestra	gr	8742.00	8637.00	8770.00	
D	Volumen del Molde	gr	6434.88	6434.88	6434.88	
E	Peso Unitario	gr/cm3	1.36	1.34	1.36	1.355
	Peso Unitario Compactado	Kg/m3	1358.53	1342.22	1362.88	1,354.54

Fuente: Elaboración propia

Resultados (Resumen)

Tabla 38: Porcentajes de vacío del agregado compactado.

Descripción	SUELTO		COMPACTADO	
	Peso Unitario	Porcentaje de vacíos	Peso unitario	Porcentaje de vacíos
Agregado fino	1,25 gr/cm3		1,33 gr/cm3	
Agregado grueso	1,31 gr/cm3		1,35 gr/cm3	

Fuente: Elaboración propia

e) Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

El presente ensayo se realizó de acuerdo al EM 2000, MTC E 204-2000; ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS, el cual está basado en la norma ASTM C136.

Equipo utilizado

- Balanza con aproximación a 0.1% del peso del material ensayado.
- Tamices normalizados (1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200, base y tapa)
- Horno a 102 +/- 5°C

Descripción del proceso

Tabla 39: Descripción del proceso de elaboración del ensayo granulométrico del agregado fino y grueso.



a) Se separa el material por la malla N° 4, el retenido será agregado grueso y el fino será el que pase este tamiz.

b) La muestra para someterse al tamizado fue lavada y secada por un periodo de 24 horas a una temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$.



c) Una vez obtenido el material seco y libre de impurezas se vierte en el juego de tamices y se comienza el proceso con ligeros golpes y girando el conjunto hasta obtener el peso constante en cada tamiz.

d) Para el agregado grueso, por ser mayor la cantidad, el total de la muestra se pasará por cada tamiz.

Agregado fino:



Agregado grueso



- e) Cada cantidad retenida de agregado se pesa, incluyendo lo que queda en la base; además se deberá pesar el total del material antes de comenzar la operación y compararla con la suma de los retenidos en las mallas, que como se explicó, esta diferencia no deberá exceder el 0.3%.

Fuente: Elaboración propia

Cálculos

- Agregados

Tabla 40: Granulometría del agregado grueso y fino.

MALLAS SERIE AMERICANA	ANALISIS GRANULOMETRICO				
	ABERTURA (mm)	Pesos Retenidos	RET (%)	PASA (%)	ESPECIFICACIONES "B"
3"	76.200				
2 1/2"	63.500			100	
2"	50.800	0.00	0.00	100	
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	100.00	100
1"	25.400	270.40	3.38	96.62	90 100
3/4"	19.050	1151.20	14.39	82.23	65 100
1/2"	12.700	1500.20	18.75	63.48	

3/8"	9.525	781.90	9.77	53.70	45	80
1/4"	6.350	0.00	0.00	53.70		
N° 4	4.760	1324.00	16.55	37.15	30	65
N° 6	3.360	0.00	0.00	37.15		
N° 8	2.380	925.10	11.56	25.59		
N° 10	2.000	0.00	0.00	25.59	22	52
N°16	1.190	947.90	11.85	13.74		
N° 20	0.840	0.00	0.00	13.74		
N° 30	0.590	700.60	8.76	4.98		
N° 40	0.426	0.00	0.00	4.98	15	35
N° 50	0.297	263.90	3.30	1.69		
N° 80	0.177	0.00	0.00	1.69		
N° 100	0.149	106.50	1.33	0.35		
N° 200	0.074	19.40	0.24	0.11	5	20
-200		7.40	0.09	-		
Peso Inicial:	8000.00					

Fuente: Elaboración propia

Luego de obtener el porcentaje de pasante acumulado, se realiza el gráfico de la curva granulométrica par para el Agregado fino y grueso, como lo muestra la Fig. 32, adicionalmente se grafica al agregado en su estado natural y los límites máximo y mínimo para cada uno.

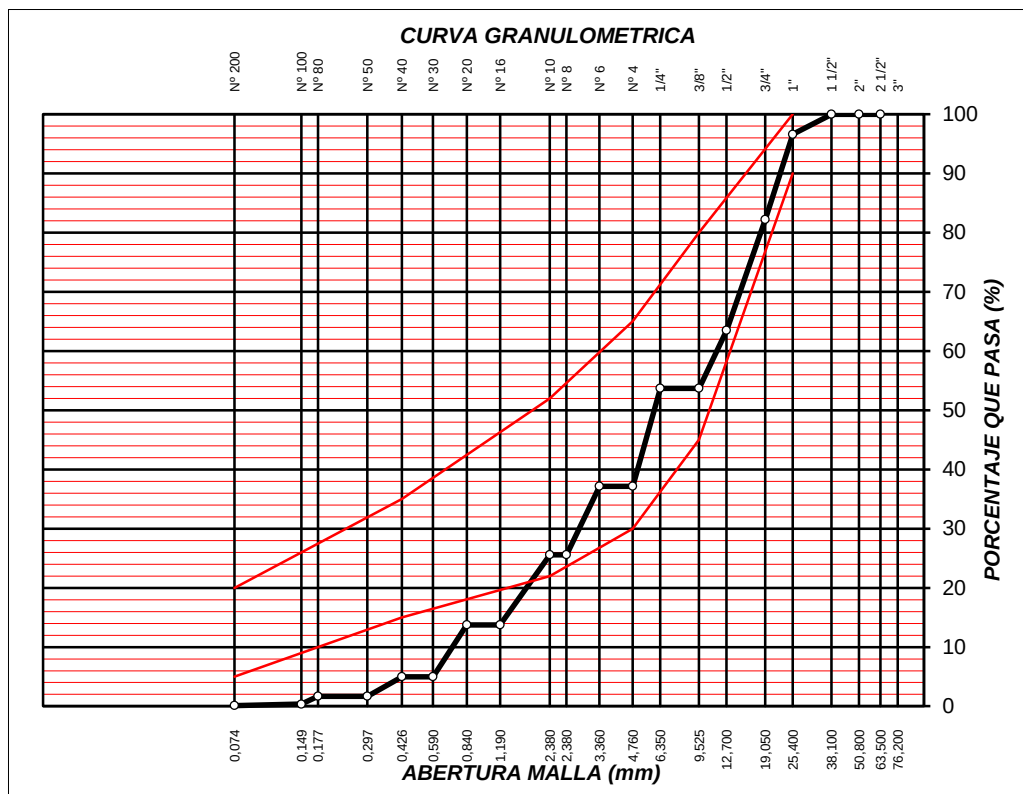


Figura 32: Curvas granulométricas, que representan la curva natural del agregado grueso y fino de la cantera del río Ichu.

f) Abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaño menores de 37.5 mm (1 ½")

El presente ensayo permite determinar la resistencia que presenta el agregado grueso frente al desgaste abrasivo empleando por la Máquina de los Ángeles. Se realizó de acuerdo al EM 2000, MTC E 207-2000, ABRASIÓN LOS ÁNGELES (L.A.) AL DESGASTE DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5mm (1 ½"), el cual está basado en la norma ASTM C 131.

Equipo utilizado

- Horno a 105 +/- 5°C
- Tamices ¾", ½", 3/8", y N°12
- Bandejas
- Equipo de Los Ángeles
- Cucharón

Descripción del proceso

Tabla 41: Descripción del proceso de elaboración del ensayo de Abrasión Los Ángeles (L.A.) al desgaste de los agregados de tamaño menores de 37.5 mm ($1\frac{1}{2}$ ").

	
a) Se selecciona el método y el material de acuerdo al MTC E 207 – 2000, en nuestro caso se trata del método A para el agregado grueso; el total del material es de 5000gr.	b) El material a ser utilizado en el presente ensayo deberá estar lavado y seco.
	
c) La norma establece que para el método de ensayo A se usan 12 esferas, éstas junto con el total del material se depositan en la máquina de Los Ángeles y se programa, según indica el manual, 500 revoluciones a 30-33rpm	d) Una vez culminada esta sección, se retira el material y se tamiza por la malla N°12, el retenido se lava y se seca al horno y se pesa dicho material

Fuente: Elaboración propia

Cálculos

El resultado del ensayo es la diferencia entre el peso original y el peso final de la muestra ensayada, expresado como tanto por ciento del peso original.

El resultado del ensayo (% desgaste) recibe el nombre de coeficiente de desgaste de Los Ángeles, calculándose tal valor de la siguiente manera:

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{100 * (P_1 - P_2)}{P_1}$$

Dónde:

P₁= Peso de la muestra seca antes del ensayo.

P₂= Peso de la muestra sea después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1.70 mm (N° 12)

El ensayo de desgaste de abrasión por la cantidad de material retenido en cada abertura, permite evaluar esta propiedad en el tipo de Granulometría natural y normalizada.

Tabla 42: Datos de abrasión de los agregados gruesos.

PASA EL TAMIZ		RETENIDO EN EL TAMIZ		PESOS Y GRANULOMETRIAS (grs)
Mm	pulg.	mm	pulg.	A
37.5	1 1/2"	25	1"	0
25	1"	19	3/4"	0
19	3/4"	12.5	1/2"	1250
12.5	1/2"	9.5	3/8"	1250
9.5	3/8"	6.3	1/4"	1250
6.3	1/4"	4.75	Nº4	1250
4.75	Nº4	2.36	Nº8	
PESO MUESTRA SECA TOTAL			gr	5000
PESO DESPUES DEL ENSAYO			gr	3921.9
PESO OBTENIDO < MALLA Nº 12			gr	1078.1
No DE ESFERAS			Nº	12
PESO DE LAS ESFERAS			gr	5025
PORCENTAJE DE DESGASTES			%	21.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43: Resumen de los ensayos realizados.

ENSAYO REALIZADO	AGREGADO FINO		AGREGADO GRUESO	
Contenido de Humedad W%	10.47	%	4.14	%

Peso Específico Aparente	2.40	gr/cm ³	2.26	gr/cm ³
Peso Específico Aparente SSS	2.51	gr/cm ³	2.33	gr/cm ³
Peso Específico Nominal	2.67	gr/cm ³	2.45	gr/cm ³
Absorción	4.17	%	3.43	%
Peso Unitario Suelto	1.25	gr/cm ³	1.31	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	1.33	gr/cm ³	1.35	gr/cm ³
Abrasión Los Ángeles (500 rev.)	-	-	21.56	%

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Elaboración de probetas cilíndricas de concreto permeable.

4.1.2.1. Diseño de mezcla de concreto permeable

Una vez que se conocen las propiedades inherentes a cada uno de los componentes del concreto permeable, es necesario que éstos se combinen en proporciones adecuadas para cumplir con las especificaciones solicitadas (resistencia a la compresión y permeabilidad), y tener un comportamiento eficiente ante las condiciones a las que estará expuesto.

El diseño de mezclas del concreto permeable se asemeja al diseño de mezclas del concreto convencional por el método del ACI, ambos utilizan cuadros obtenidos empíricamente de ensayos realizados, sin embargo, en cuanto a los alcances de ambos diseños son totalmente diferentes.

Para obtener el diseño de mezcla de nuestro concreto no convencional, se tuvo en cuenta la Guía para la Selección de Proporciones para Concretos con Cero Slump (Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete, ACI 2113R (1988) y el procedimiento de diseño que brinda el Reporte en Concreto Permeable (Report on Pervious Concrete, ACI 522R-10 (2010), en la cual brinda el método de diseño, consideraciones y tablas empíricas necesarias para el proporcionamiento de materiales.

El diseño de mezclas del concreto permeable debe ser orientado para garantizar la funcionalidad del mismo, De acuerdo a los objetivos de la presente investigación, se ha optado por realizar tres diseños de mezclas teniendo en cuenta que el primero cumplirá el primer objetivo

específico el cual es: Obtención del huso granulométrico del agregado grueso de la cantera del río Ichu para el uso en el concreto permeable aplicado a pavimentos de bajo tránsito – $f'c$ 175kg/cm², y el segundo diseño de mezclas estará orientado para desarrollar el objetivo principal y demás objetivos específicos, los cuales son: Determinar la influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - $f'c$ 175 kg/cm².

4.1.2.1.1. Los Materiales

- **Materiales Cementantes:** Se utilizaron para la investigación el Cemento Portland Tipo I (ASTM C150), marca Cemento Andino, por ser de uso general en las obras públicas y privadas, y la marca Cemento Andino por ser la más comercial en la ciudad de Huancavelica.
- **Agregados:** Se utilizaron los agregados provenientes de la cantera río Ichu (Callqui Chico), tres tamaños de agregado grueso 3/8", 1/2" y 3/4" (ASTM C33) para diferentes diseños de mezcla.
- **Agua:** Se utilizó agua potable de la ciudad universitaria Paturpampa.

4.1.2.1.2. Criterios de diseño de mezclas

Para el concreto permeable, las relaciones agregado-cemento ($A^{\circ}G^{\circ}/C$) y agua-cemento (A/C) son las principales variables que afectan a las propiedades mecánicas del mismo. Se ha considerado aceptable un amplio rango de valores de relaciones a/c , dependiendo de la aplicación específica.

La tabla 4 muestra los rangos típicos del proporcionamiento de materiales en el concreto permeable y son solo valores de referencia.

Tabla 44: Rangos Típicos de las proporciones de materiales en el concreto permeable

Parámetro	Rango
Materiales cementantes, kg/m ³	270 a 415
Agregado, kg/m ³	1190 a 1480
Relación agua-cemento, en peso	0.26 a 0.45
Relación agregado-cemento, en peso	4 a 4.5:1
Relación agregado fino-agregado grueso, en peso	0 a 1:1

Fuente: Flores & Pacompia, (2015)

a) Relación agua – cemento (a/c)

Brundell (2006) señala que la relación a/c tiene un gran efecto en las propiedades de la mezcla obtenida. Si se utiliza una cantidad deficiente de agua se obtendrá como resultado una mezcla sin consistencia y con una baja resistencia a la compresión. Una cantidad excesiva de agua ocasionará que la pasta selle los espacios vacíos de la mezcla, lavando además los áridos dejándolos expuestos, y por consiguiente tendrán baja resistencia al desgaste.

En el concreto permeable, el contenido de agua óptima produce una pasta de cemento totalmente húmeda con una alta viscosidad. Esta mezcla tendrá un aspecto metálico mojado o con brillo. Para una proporción mezcla dada, tipo y tamaño de los agregados, hay un estrecho rango óptimo de relación a/c; la pasta de cemento de esta mezcla óptima creará suficiente unión entre las partículas de agregado sin filtrarse a través de la red de poros y provocar el cierre de la estructura de vacío deseado. (Barahona, Martinez, & Zelaya, 2013)

La elección de la relación a/c óptima depende principalmente de la gradación y las características físicas de los agregados gruesos y del volumen de materiales cementantes de la mezcla. En el concreto permeable, la relación a/c para obtener la trabajabilidad

necesaria por lo general cae dentro del rango de 0,26 a 0,45. La trabajabilidad del concreto permeable se supone que es satisfactoria si el agua suficiente mezcla se utiliza para impartir un aspecto metálico a la mezcla. Al comprimir y soltar un puñado de la mezcla, esta no se deberá desmoronar ni la pasta debe fluir lejos de las partículas de agregado. La consistencia correcta se obtiene normalmente a través de un proceso de inspección, que asegura que cada mezcla contiene cemento suficiente pasta para recubrir las partículas gruesas con una película brillante, dándole un brillo metálico. (Flores & Pacompia, 2015)

Altas relaciones a/c puede resultar en la pasta que fluye desde el agregado y relleno la estructura de vacíos. Una baja relación a/c puede dar lugar a reducción de la adhesión entre las partículas de agregado y problemas la colocación.

La experiencia ha demostrado que las relaciones a/c de 0,26 a 0,45 proporcionan un buen recubrimiento del agregado y una adecuada estabilidad de la mezcla. El contenido de material cementante total de una mezcla de concreto permeable es importante para el desarrollo de resistencia a la compresión y sin efecto estructura. Un alto contenido de pasta resultará en una estructura de vacío llenado y, en consecuencia, porosidad reducida. Un contenido insuficiente de cemento puede resultar en reducción de revestimiento de pasta del agregado y reducida resistencia a la compresión. El contenido óptimo de material cementante es fuertemente dependiente de tamaño de los agregados y la gradación. (Flores & Pacompia, 2015)

b) Relación agregado-cemento

Castro (2011), pone de manifiesto que las relaciones agregado-cemento AG/C en general varían entre 4:1 a 4.5:1, pero ésta relación depende fundamentalmente del tipo de agregado. Tanto

la relación agua-cemento y la relación agregado-cemento deben satisfacer las características de permeabilidad, capacidad de carga y durabilidad.

4.1.2.1.3. Procedimientos de diseño

a) Elección del porcentaje de vacíos

La elección del porcentaje de vacíos depende de la velocidad de filtración de agua pluvial requerida, la cual se determina por la intensidad de evento de diseño (para un periodo de retorno y duración de evento), obtenido por datos históricos de precipitación en el lugar donde se colocará el pavimento permeable (Ciudad de Huancavelica).

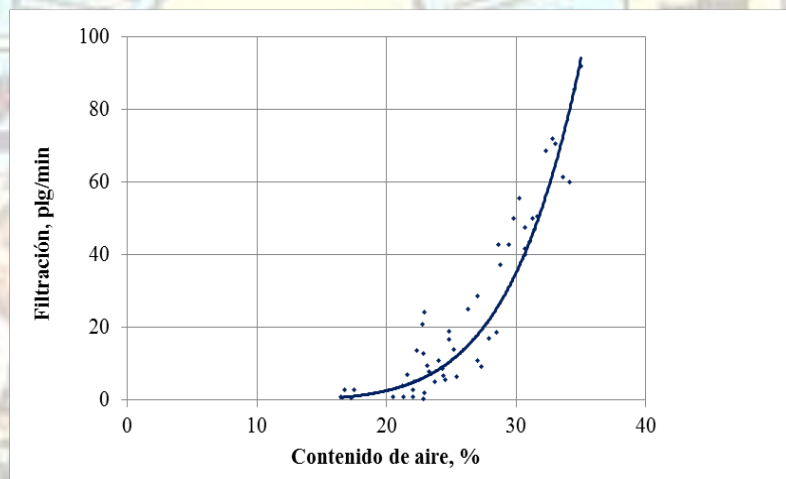


Figura 33: Relación entre el contenido de aire y la tasa de filtración, (ACI 522R-10, ACI 211.3R-02)

b) Determinación del volumen de pasta

Luego de haber verificado las resistencias a compresión referenciales, se procede a calcular el volumen de pasta de acuerdo al (ACI 522R-10 y ACI-211.3R-02), en el cual, a partir del contenido de vacíos elegido, podemos obtener el porcentaje del volumen de pasta en la mezcla.

La figura 35 muestra la relación entre el contenido de vacíos y el volumen de pasta necesario para concretos permeables elaborados con tamaño de agregado grueso No. 8.

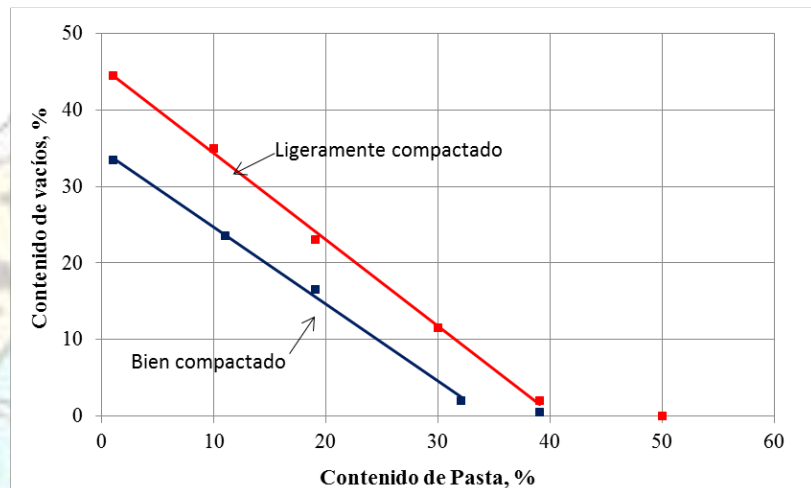


Figura 34 Relación entre el porcentaje de vacíos y el contenido de pasta para tamaños de agregados No. 8 (ACI522R-10, 2010)

En el presente gráfico se observa que se tiene dos curvas, las cuales definen el tipo de compactación que se tendrá en cuenta durante el vaciado del concreto permeable y durante la elaboración de probetas (briquetas) in situ, estas son: ligeramente compactada, donde se incrementa el volumen de pasta y la bien compactada disminuye el volumen de pasta, esta condición se identifica en un mismo porcentaje de vacíos.

Una vez determinado el volumen de pasta necesario, se determinan los pesos de cemento y agua por metro cúbico de mezcla, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_p = V_c + V_a$$

Donde:

V_p: Volumen de pasta.

V_c: Volumen de cemento.

V_a: Volumen de agua.

La ecuación puede ser expresada como:

$$Vp = \frac{c}{P.E.c} + \frac{a}{P.E.a}$$

Donde:

c: Peso del cemento por m³ de mezcla.

a: Peso del agua por m³ de mezcla.

P.E.c: Peso específico del cemento.

P.E.a: Peso específico del agua.

Considerando que el peso específico del cemento y agua son 2.99 y 1.00 respectivamente, se tiene:

$$Vp = \frac{c}{2.99 * 1000} + \frac{a}{1.00 * 1000}$$

Con la relación a/c, obtenemos:

$$Vp = \frac{c}{2.99 * 1000} + \frac{\frac{a}{c} * c}{1.00 * 1000}$$

Cuando el agregado fino es utilizado, el volumen de pasta debe ser reducido en 2% por cada 10% del agregado fino del total del agregado para concreto permeable bien compactado y por cada 1% por cada 10% del agregado fino del total del agregado para concreto permeable ligeramente compactado. (ACI 211.3R-02). Estas reducciones son utilizadas para mantener el mismo porcentaje de vacíos por volumen.

c) Elección de la relación agua-cemento

En cuanto a la relación agua-cemento a/c, el reporte ACI 211.3R-02, recomienda utilizar una relación a/c entre 0.35 a 0.45; los que aseguran que la pasta recubra por completo todos los áridos, uniéndolos de tal forma que no comprometan la formación de poros y por ende su permeabilidad. Un exceso de agua puede generar el colapso del sistema de poros que son lo más importante en este tipo de concreto ya que ellos son los que permiten el paso del agua. Un déficit de agua produce una ligadura deficiente entre los áridos.

d) Método de volúmenes absolutos y corrección

Una vez obtenido el porcentaje de vacíos, volumen de pasta, y la relación agua/cemento, se calcula la cantidad de cada material convirtiendo a un volumen absoluto por metro cúbico en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS) como se realiza en el concreto convencional, se corrige luego por humedad y se obtiene la cantidad de materiales por metro cúbico para el diseño.

e) Corrección por humedad y absorción

El Contenido de Humedad, se refiere a la condición actual del agregado que por motivo de exposición al ambiente ha podido perder o ganar agua; el porcentaje de Absorción es la capacidad que tiene el agregado de absorber agua, entonces si al contenido de humedad (condición presente en el vaciado) se le resta el porcentaje de absorción (capacidad de absorber agua), estamos conociendo la cantidad de agua que el agregado va a absorber durante el vaciado, por lo tanto, se sabe de la cantidad de agua que debemos retirar o adicionar del seco para corregirlo, teniendo:

$\%CH > \% Abs$: Se retira Agua en el diseño SSS.

$\%CH < \% Abs$: Se adiciona Agua en el diseño SSS.

f) Agua

El concreto permeable debe ser proporcionado con una relación agua-cemento (a/c) relativamente baja (0.35 a 0.45), ya que una cantidad excesiva de agua conducirá a drenar la pasta y el atascamiento del sistema de poros (ACI 522, 2006). La adición del agua, por consiguiente, tiene que ser supervisada cuidadosamente en el campo.

4.1.2.2. Proceso de ejecución y resultados del diseño de mezcla para concreto permeable de $f_c=175 \text{ kg/cm}^2$:

Materiales

a) **Agregado Grueso y fino:** El proceso detallado, descrito líneas arriba, de los ensayos de laboratorio practicado a los agregados de la cantera del río Ichu (Callqui Chico), arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 45: Resultados de los diferentes ensayos de laboratorio practicados al agregado grueso y fino (Resumen)

ENSAYO REALIZADO	AGREGADO FINO		AGREGADO GRUESO	
Contenido de Humedad W%	10.47	%	4.14	%
Peso Específico Aparente	2.40	gr/cm ³	2.26	gr/cm ³
Peso Específico Aparente SSS	2.51	gr/cm ³	2.33	gr/cm ³
Peso Específico Nominal	2.67	gr/cm ³	2.45	gr/cm ³
Absorción	4.17	%	3.43	%
Peso Unitario Suelto	1.25	gr/cm ³	1.31	gr/cm ³
Peso Unitario Compactado	1.33	gr/cm ³	1.35	gr/cm ³
Abrasión Los Ángeles (500 rev.)	-	-	21.56	%

Fuente: Elaboración propia

b) **Cemento:** El cemento a utilizar será CEMENTO ANDINO PORTLAND TIPO I.

c) **Agua:** Agua potable de la ciudad Universitaria Paturpampa – Huancavelica.

Criterios de Diseño:

a) **% de Agregado Fino Incluido:** Se consideró el 10% del total del agregado.

b) **Nivel de compactación:** Se consideró Ligeramente Compactado, debido a que este nivel de compactación permite contener un mayor contenido de pasta en la mezcla.

Procedimiento de Diseño de Mezcla:

a) **Filtración que el Concreto Permeable requiere:**

Del estudio Hidrológico realizado anteriormente para la ciudad de Huancavelica para pavimentos permeables de bajo tránsito, para un periodo de retorno de 10 años y una duración de 60 minutos, se estima una Intensidad de lluvia de 21.68 mm/h. Considerando que el concreto permeable diseñado sea capaz de filtrar una eventual precipitación con la intensidad máxima determinada, se obtuvo:

Filtración requerida: 216.8 mm/h

b) Porcentaje de Vacíos:

De la figura se obtiene el porcentaje de vacíos en función a la filtración requerida que es 216.8 mm/h para el concreto permeable.

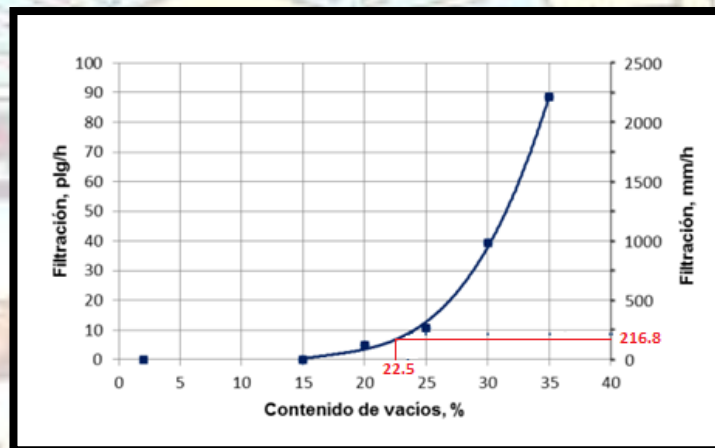


Figura 35: Contenido de vacíos vs Filtración requerida (Adaptado de: ACI 522R-10, 2010)

% de vacíos de Diseño: 22.5 %

c) Relación Agua - Cemento (a/c):

De acuerdo al ACI 522R-10 y ACI 211.3R-02 recomiendan utilizar una relación de agua/cemento en el intervalo de 0.35 a 0.45, esto asegura que la pasta recubra por completo todos los agregados.

Para el diseño de mezcla del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito se fijó en 0.40, tomando en cuenta los resultados obtenidos por investigaciones referentes a la relación a/c del concreto permeable.

a/c de diseño: 0.40

d) Cálculo de agua ($Vol. de pasta = Vol. de Cemento + Vol. de agua$)

Considerando el nivel de compactación y el porcentaje de vacíos, se obtiene el porcentaje de pasta en volumen de acuerdo al siguiente gráfico:

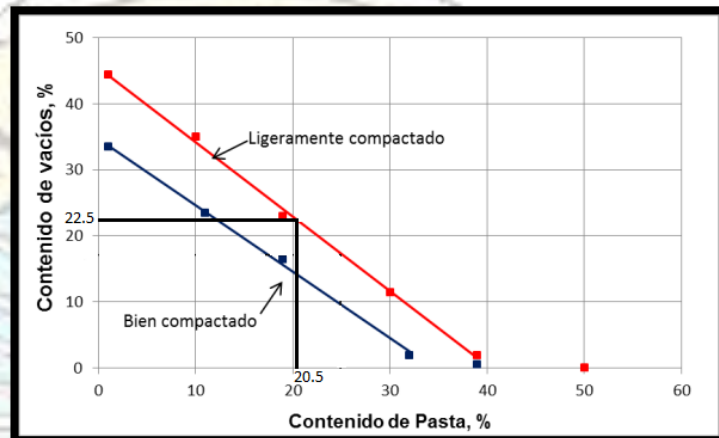


Figura 36: Contenido de pasta vs Contenido de Vacíos (Adaptado de: ACI 522E-10, 2010)

Como se consideró en el criterio de diseño un 10% de agregado fino del total de agregado, debemos reducir el porcentaje de pasta en 1% bajo la condición de ligeramente compactado, obteniendo así un % de pasta de 19.5%

% de pasta: 19.5%

Entonces: $V_p = V_c + V_a$

Donde:

V_p : Volumen de pasta
 V_c : Volumen de cemento
 V_a : Volumen de agua

$$V_p = \frac{c}{P.E.c} + \frac{a}{P.E.a}$$

Donde:

c : Peso del cemento por m3 de mezcla
 a : Peso del agua por m3 de mezcla
 $P.E.c$: Peso específico del cemento
 $P.E.a$: Peso específico del agua

Reemplazando:

$$V_p = \frac{c}{2.99 * 1000} + \frac{a}{1.00 * 1000}$$

$$V_p = \frac{c}{2.99 * 1000} + \frac{\frac{a}{c} * c}{1.00 * 1000}$$

$$0.195 = \frac{c}{2.99 * 1000} + \frac{0.40 * c}{1.00 * 1000}$$

Por tanto: c : 265.51 Kg
 a : 106.2 Kg

e) Cálculo de Volúmenes Absolutos:

- Obtención de la cantidad de Agregado Grueso:

Tabla 46: Obtención de la cantidad de agregado grueso

	Pesos (Kg)	Pes. Esp. (Kg/m3)	Volumen (m3)
Agua	106.2	1000	0.106
Cemento	265.51	2990	0.089
Vacíos			0.225
		Parcial	0.42
		Agregado Grueso	0.58
		Total	1

Fuente: Elaboración Propia

- Corrección por incorporación de Agregado Fino (10% del total de agregado)

Tabla 47: Corrección por incorporación de Agregado fino.

	Pesos (Kg)	Pes. Esp. (Kg/m3)	Volumen (m3)
A. Fino (10%)	145.29	2505.01	0.058
A. Grueso Corregido	1218.67	2334.61	0.522

Fuente: Elaboración Propia

- Volumen de materiales del Diseño de Mezcla del Concreto Permeable

Tabla 48: Volumen de materiales del diseño de mezcla

	Pesos (Kg)	Pes. Esp. (Kg/m3)	Volumen (m3)
Cemento	265.51	2990	0.089
Agregado Fino	145.29	2505.01	0.058
Agregado Grueso	1218.67	2334.61	0.522
Agua	106.2	1000	0.106
Vacíos			0.225
		Total	1

A/C	0.4
A°G°/C	4.59

Fuente: Elaboración Propia

- Corrección por humedad, Absorción y Aporte:

Tabla 49: Corrección por humedad, Absorción y Aporte.

	Agregado Grueso	Agregado Fino
Humedad (%)	4.14	10.47
Absorción (%)	3.43	4.17
Aporte	8.65 Lt	9.15 Lt

Fuente: Elaboración Propia

- Valores de Diseño corregido por Humedad

Tabla 50: Valores de Diseño corregido por Humedad

	Cantidades	Unidad
Cemento	265.51	kg/m ³
A. Fino Húmedo	160.50	kg/m ³
A. Grueso Húmedo	1269.11	kg/m ³
Agua Efectiva	88.39	kg/m ³

Fuente: Elaboración Propia

- Proporciones de Diseño de Mezcla del Concreto Permeable por Peso:

Tabla 51: Proporciones de Diseño de Mezcla del Concreto Permeable por Peso

	Cantidades
Cemento	1.00
A. Fino Húmedo	0.60
A. Grueso Húmedo	4.78
Agua Efectiva	0.33

Fuente: Elaboración Propia

f) Cantidad de probetas por cada tamaño del Agregado Grueso:

De acuerdo a la norma **ASTM C 31**, la cual especifica que, para garantizar la veracidad de los resultados del ensayo a compresión del concreto, se determinó la cantidad de probetas y así poder

promedian resultados de resistencia de dos a seis Probetas. Por lo que en la presente tesis el resultado de resistencia a la compresión de cada tratamiento, corresponde el promedio de **ocho** probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

Tabla 52. Número de Probetas para Ensayo a Resistencia a Compresión.

Tamaño de A°G°	N° de probetas
3/8"	8
1/2"	8
3/4"	8
Total de probetas	24

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.3. Elaboración y curado de Probetas cilíndricas de Concreto Permeable:

La mezcla fue realizada en el laboratorio de concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica, de acuerdo a la norma **NTP 339.033** similar a la del concreto convencional, utilizando mezcladora eléctrica de eje horizontal tipo trompo de 3 p3 de capacidad, se consideró por tanda una mezcla para 8 probetas cilíndricas, incrementando a la dosificación un 15% de desperdicio.

Tabla 53. Cantidad de mezcla por tanda con porcentaje de desperdicio de 15%.

MATERIAL	AGREGADO GRUESO (3/8")	AGREGADO GRUESO (1/2")	AGREGADO GRUESO (3/4")
	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Cemento	12.950 Kg	12.950 Kg	12.950 Kg
Agregado Fino	7.086 Kg	7.086 Kg	7.086 Kg
Agregado Grueso	59.438 Kg	59.438 Kg	59.438 Kg
Agua	5.180 Kg	5.180 Kg	5.180 Kg

Fuente: Elaboración Propia

a) Mezclado del Concreto Permeable:

Después de haber obtenido el diseño de mezcla del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$ se procedió a mezclar en el trompo electrónico:



(a)

(b)

Fotografía 1: Procedimiento de mezclado del concreto permeable

a) Pre mezcla de Cemento y agregados.

b) Adición de agua y mezclado del concreto.

Antes del vaciado a los moldes, se realizó ensayos en estado fresco del concreto permeable ACI 522R-10 (2010) “Reporte en el concreto permeable”) con la finalidad de controlar el contenido de vacíos de diseño y la trabajabilidad de la mezcla de concreto, que son parámetros principales de control.

b) Densidad y Contenido de Vacíos en Estado Fresco del Concreto Permeable (ASTM-C1688):

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM-C1688, 2010.

Equipo Utilizado:

- Pisón o martillo (2.5 Kg)
- Balanza
- Recipiente (Briqueta)



Fotografía 2: Equipos utilizados para el ensayo de peso unitario del concreto permeable.

Descripción del Proceso:

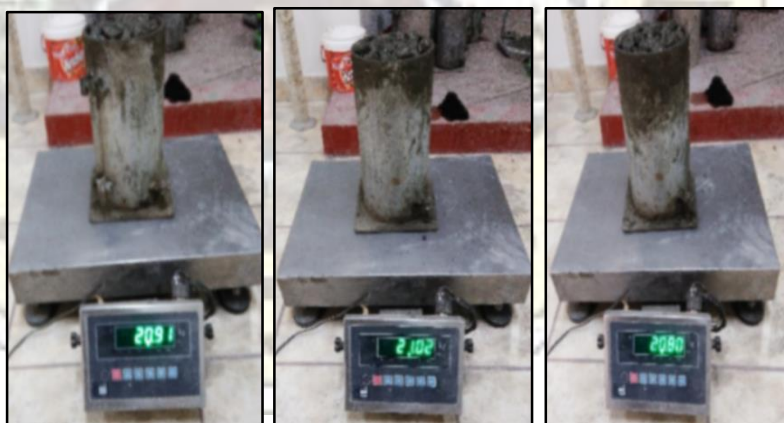
- Se coloca el concreto permeable en la briqueta en tres capas iguales usando un badilejo.
- Luego se compacta con el martillo (Proctor estándar) 20 veces por cada capa a una altura de 12" para cada capa, distribuyendo uniformemente los golpes en toda la superficie.
- Finalmente se enrasa con una varilla desde el centro hacia fuera de manera que la superficie quede nivelada y se pesa en la balanza electrónica.

Agregado grueso $\varnothing=1/2''$



Fotografía 3: Pesado del material de $\varnothing=1/2$ más la briqueta utilizada.

Agregado grueso $\varnothing=3/4''$



Fotografía 4: Pesado del material de $\varnothing=3/4$ más la briqueta utilizada.

Agregado grueso Ø=3/8"



Fotografía 5: Pesado del material de Ø=3/8 más la briqueta utilizada.

Ecuación para el Cálculo de Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco:

$$D = \frac{Mc - Mm}{Vm} \quad U = \frac{T - D}{T} * 100\%$$

Donde:

D: Peso unitario del concreto (Kg/m³)

T: Densidad teorica del concreto caulculada al aire libre (Kg/m³)

U: Porcentaje de vacíos en estado fresco del concreto permeable, incluyendo el aire atrapado dentro de la pasta.

Ms: Masa total de todos los materiales de la mezcla (Kg)

Mc: Masa llena con concreto (Kg)

Mm: Masa de la briqueta (Kg)

Resultados en Estado Fresco:

PESO UNITARIO:

Tabla 54. Peso Unitario en Estado Fresco Ø 3/8"

TAMAÑO DE AGREGADO: 3/8	M-1	M-2	M-3
Masa de concreto + masa de briqueta (Mc)	20.33	20.29	20.31
Masa de briqueta (Mm)	10.65	10.8	10.8
Volumen de briqueta (Vm)	0.0053	0.0053	0.0053
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Peso unitario del concreto (D) ---> (Mc-Mm)/Vm	1826.42	1790.57	1794.34
Promedio de Peso Unitario del Concreto	1803.77 Kg/m³		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 55. Peso Unitario en Estado Fresco Ø 1/2"

TAMAÑO DE AGREGADO: 1/2	M-1	M-2	M-3
Masa de concreto + masa de briqueta (Mc)	20.24	20.17	20.23
Masa de briqueta (Mm)	10.65	10.65	10.65
Volumen de briqueta (Vm)	0.0053	0.0053	0.0053
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Peso unitario del concreto (D) ---> (Mc-Mm)/Vm	1809.43	1796.23	1807.55
Promedio de Peso Unitario del Concreto	1804.40 Kg/m3		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Peso Unitario en Estado Fresco Ø 3/4"

TAMAÑO DE AGREGADO: 3/4	M-1	M-2	M-3
Masa de concreto + masa de briqueta (Mc)	20.39	20.43	20.32
Masa de briqueta (Mm)	10.65	10.65	10.65
Volumen de briqueta (Vm)	0.0053	0.0053	0.0053
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Peso unitario del concreto (D) ---> (Mc-Mm)/Vm	1837.74	1845.28	1824.53
Promedio de Peso Unitario del Concreto	1835.85 Kg/m3		

Fuente: Elaboración propia.

PORCENTAJE DE VACÍOS:

Tabla 57. Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco Ø 3/8"

TAMAÑO DE AGREGADO: 3/8	M-1	M-2	M-3
Masa total de todos los materiales de la mezcla (Ms)	1783.51	1783.51	1783.51
Volumen absoluto de cada ingrediente (Vs)	0.775	0.775	0.775
Densidad teórica del concreto (T) --> Ms/Vs	2301.3	2301.3	2301.3
Peso unitario del concreto (D)	1826.42	1790.57	1794.34
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Porcentaje de vacíos en estado fresco (U) --> (T-D)/T	20.64	22.19	22.03
Promedio de % de Vacíos	21.62		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 58. Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco Ø 1/2"

TAMAÑO DE AGREGADO: 1/2	M-1	M-2	M-3
Masa total de todos los materiales de la mezcla (Ms)	1783.51	1783.51	1783.51
Volumen absoluto de cada ingrediente (Vs)	0.775	0.775	0.775
Densidad teórica del concreto (T) --> Ms/Vs	2301.3	2301.3	2301.3
Peso unitario del concreto (D)	1809.43	1796.23	1807.55
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Porcentaje de vacíos en estado fresco (U) --> (T-D)/T	21.37	21.95	21.46
Promedio de % de Vacíos	21.59		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 59. Porcentaje de Vacíos en Estado Fresco Ø 1/2"

TAMAÑO DE AGREGADO: 3/4	M-1	M-2	M-3
Masa total de todos los materiales de la mezcla (Ms)	1783.51	1783.51	1783.51
Volumen absoluto de cada ingrediente (Vs)	0.775	0.775	0.775
Densidad teórica del concreto (T) --> Ms/Vs	2301.3	2301.3	2301.3
Peso unitario del concreto (D)	1837.74	1845.28	1824.53
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Porcentaje de vacíos en estado fresco (U) --> (T-D)/T	20.14	19.82	20.72
Promedio de % de Vacíos	20.23		

Fuente: Elaboración propia

c) Métodos de Pruebas Alternativo del Cono Invertido:

El método más común para determinar la trabajabilidad del concreto convencional es la prueba de revenimiento o slump (ASTM C143-00), para el concreto permeable esta prueba no puede ser aplicado ya que tiene una característica especial que el Slump es cero, debido a la baja relación de agua cemento utilizadas para los diseños de mezcla.

Entonces el ASTM propone métodos alternativos para poder determinar la trabajabilidad del concreto poroso, uno de los métodos propuestos por la ASTM es en ensayo de Cono Invertido utilizado para concretos fluidos (Autocompactantes), donde la trabajabilidad se mide por la dificultad que tiene la mezcla porosa en el paso por el orifico menor del cono de Abrams sin ningún tipo de compactación únicamente por gravedad.

Equipo Utilizado:

- Cono de Abrams
- Varilla metálica para nivelar la superficie.



Fotografia 6: Equipos utilizados para el ensayo de cono invertido.

Descripción del Proceso:

- Colocar el cono invertido en el centro de la plancha.
- Llenar el cono invertido con el badilejo con concreto permeable sin aplicar ningún tipo de compactación.
- Enrasar con una varilla dejando la superficie nivelada.
- Levantar el cono hacia arriba en forma perpendicular a la superficie, finalmente colocar el cono al costado de mezcla y medir el radio generado y la altura de asentamiento.

Agregado grueso $\varnothing=3/8"$



Fotografía 7: Procedimiento de ensayo de revenimiento o slump en el concreto permeable de $\varnothing=3/8"$ (asentamiento 0 cm)



Fotografía 8: Ensayo del cono invertido en el concreto permeable de $\varnothing=3/8"$

Agregado grueso $\varnothing=1/2''$



Fotografía 9: Procedimiento de ensayo de revenimiento o slump en el concreto permeable de $\varnothing=1/2''$ (asentamiento 0 cm)



Fotografía 10: Ensayo del cono invertido en el concreto permeable de $\varnothing=1/2''$

Agregado grueso $\varnothing=3/4''$



Fotografía 11: Procedimiento de ensayo de revenimiento o slump en el concreto permeable de $\varnothing=3/4''$ (asentamiento 0 cm)



Fotografía 12: Ensayo del cono invertido en el concreto permeable de $\phi=3/4''$

d) Elaboración de Especímenes de Concreto Permeable:

Una vez obtenido la trabajabilidad requerida mediante el cono invertido y obtenido el porcentaje de vacíos mediante el peso unitario en estado fresco, procedemos a la elaboración de especímenes cilíndricos de acuerdo a las normas **NTP 339.033** y **ASTM C 31**. A los moldes cilíndricos de 150mm de diámetro x 300 mm de altura, se ajustaron, limpiaron y cubrieron con Petróleo (desmoldante).



Fotografía 13: Moldes habilitados para el vaciado



Fotografía 14: Muestra el mezclado del concreto permeable.

Se procedió al vaciado de los especímenes de concreto permeable similar al del ensayo de peso unitario en estado fresco, se vació en tres capas, pero esta vez se compacto 25 golpes por cada capa evitando las fallas locales (bordes de la zona inferior).



Fotografía 15: Muestra el compactado del concreto permeable.



Fotografía 16: Vaciado del moldes Ø 3/8"



Fotografía 17: Vaciado del moldes Ø 1/2"



Fotografía 18: Vaciado del moldes Ø 3/4"

e) Curado de los especímenes de Concreto Permeable:

El curado de los especímenes se realizó en una tina metálica a una temperatura constante de 23 °C controlado por un termostato, en el laboratorio de concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica. El procedimiento de curado de probetas cilíndricas se realizó de acuerdo a las normas **NTP 339.033** y **ASTM C 31**, la cual el propósito de este proceso es maximizar la hidratación del cemento.

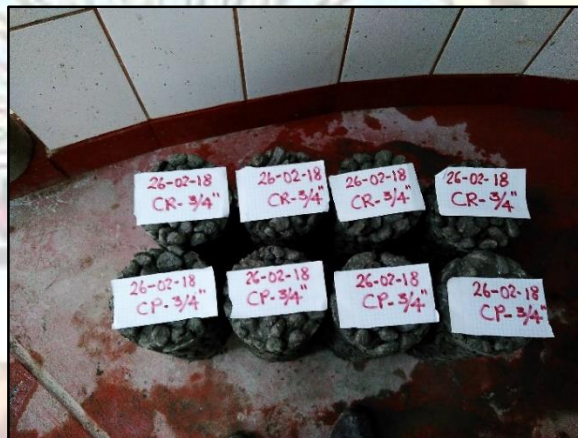
Después del vaciado de los especímenes fueron almacenados por un periodo de 24 horas, se pasaron a desencofrar las muestras de los moldes y se realizó el proceso de curado.



Fotografía 19 Desencofrado del moldes Ø 3/8"



Fotografía 20 Desencofrado del moldes Ø 1/2"



Fotografía 21 Desencofrado del moldes Ø 3/4"



Fotografía 22 Curado de especímenes

f) Densidad y Contenido de Vacíos del Concreto Permeable en Estado Endurecido:

Se realizó este ensayo con la finalidad de determinar la densidad del concreto permeable en estado endurecido y a la vez

determinar el porcentaje de vacíos, se calculó el volumen de las probetas (incluyendo el volumen de vacíos) y el volumen de los sólidos.

Para poder determinar el volumen de los sólidos, se determinó el volumen de cada testigo mediante mediciones realizadas y a los mismos se procedió a triturarlos y mediante el concepto de desplazamiento o volumen desalojado de la mecánica de fluidos, se pudo deducir el volumen de los sólidos sumergidos, este procedimiento fue elegido por la irregularidad de los mismos.

Equipo Utilizado:

- Comba
- Vernier
- Balanza
- Probetas

Descripción del Proceso:

Tabla 60: Descripción del proceso de elaboración del ensayo de Densidad y Contenido de Vacíos del Concreto Permeable en Estado Endurecido.

		
a) Se procede a pesar los especímenes de cada diámetro $\varnothing = 3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$.		

			
b) Se procede a medir el diámetro superior e inferior de los especímenes de cada diámetro Ø= 3/8", 1/2" y 3/4".		c) Se trituran los testigos de concreto permeable endurecido, en tamaños accesibles las probetas.	
			
d) Se obtiene la condición Saturado Superficialmente Seca en el material triturado, de manera similar a la metodología empleada para los agregados gruesos.		e) Se llenan las probetas con agua a un volumen inicial definido, y se introducen los sólidos. f) Se registran las medidas de volúmenes finales.	

Fuente: Elaboración propia

Ecuación para el Cálculo de Peso Unitario y Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido:

$$De = \frac{Me}{Ve} \quad Ue = \frac{Mse}{Vse} * 100\% \quad Vse = Vf - Vi$$

Donde:

De: Densidad del concreto en estado endurecido (Kg/m³)

Me: Masa de Testigo (Kg)

Ve: Volumen de Testigo (Kg)

Ue: Porcentaje de vacíos en estado endurecido del concreto permeable (%)

Mse: Masa de los sólidos del testigo (Kg)

Vse: Volumen de los sólidos del testigo (Kg)

Vf: Medida de volumen final en la probeta (m3)

Vi: Medida del volumen inicial en la probeta (m3)

Resultados en Estado Endurecido:

PORCENTAJE DE VACÍOS:

Tabla 61: Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido Ø 3/8"

3/8	M-1	M-2	M-3
Volumen inicial (Vi)	9800	9800	9800
Volumen final (Vf)	13970	13990	13950
	M-1	M-2	M-3
Diámetro superior de la briqueta	15.20	15.20	15.30
Diámetro inferior de la briqueta	15.10	15.25	15.20
Promedio de diámetro	15.15	15.23	15.25
Altura de la briqueta	31.00	31.05	30.00
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Vol. de la briqueta sin espacios vacíos (Vc)... Vf-Vi	4170.00	4190.00	4150.00
Vol. de la briqueta con espacios vacíos (Vt)... $((\pi \cdot D^2) \cdot h)/4$	5588.26	5656.55	5479.62
% de Vacíos..... $((Vt-Vc) \cdot 100)/Vt$	25.38	25.93	24.26
Promedio de % de Vacíos	25.19		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 62: Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido Ø 1/2"

1/2	M-1	M-2	M-3
Volumen inicial (Vi)	9800	9800	9800
Volumen final (Vf)	14010	14000	13990
	M-1	M-2	M-3
Diámetro superior de la briqueta	15.25	15.15	15.12
Diámetro inferior de la briqueta	15.20	15.10	15.10
Promedio de diámetro	15.23	15.13	15.11
Altura de la briqueta	31.10	30.45	31.12
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Vol. de la briqueta sin espacios vacíos (Vc)... Vf-Vi	4210.00	4200.00	4190.00
Vol. de la briqueta con espacios vacíos (Vt)... $((\pi \cdot D^2) \cdot h)/4$	5665.65	5474.63	5580.31
% de Vacíos..... $((Vt-Vc) \cdot 100)/Vt$	25.69	23.28	24.91
Promedio de % de Vacíos	24.63		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 63: Porcentaje de Vacíos en Estado Endurecido Ø 3/4"

3/4	M-1	M-2	M-3
Volumen inicial (Vi)	8400	8400	8400
Volumen final (Vf)	12635	12650	12680
	M-1	M-2	M-3
Diámetro superior de la briqueta	15.20	15.40	15.50
Diámetro inferior de la briqueta	15.10	15.20	15.20
Promedio de diámetro	15.15	15.30	15.35
Altura de la briqueta	31.12	31.20	31.10
RESULTADO	M-1	M-2	M-3
Vol. de la briqueta sin espacios vacíos (Vc)... Vf-Vi	4235.00	4250.00	4280.00
Vol. de la briqueta con espacios vacíos (Vt)... $((\pi \cdot D^2) \cdot h)/4$	5609.90	5736.24	5755.29
% de Vacíos..... $((Vt-Vc) \cdot 100)/Vt$	24.51	25.91	25.63
Promedio de % de Vacíos	25.35		

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. Ensayo de Resistencia a Compresión de Probetas

Los ensayos de compresión del concreto se efectúan para determinar la calidad general del concreto, el cual fue realizado de acuerdo a la norma **NTP 339.034** y **ASTM C39**. es importante mencionar que se realizó pruebas para obtener el mejor método de rotura de briquetas, de estas pruebas se observó que la superficie de asiento al no ser uniforme debido a la naturaleza de nuestro concreto, por lo que se buscó métodos alternativos, como el tarrajeo de la superficie con mortero, por lo que se determinó que era la mejor metodología para realizar el ensayo de compresión simple porque solucionó el problema de fallas locales.



Fotografía 23: Muestra del tarrajeo de la superficie de los especímenes (mortero)



Fotografía 24: Muestra el ensayo a la compresión simple de una briqueta con la superficie tarrajada.

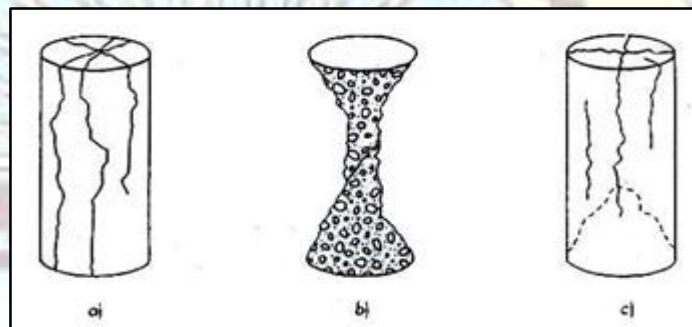


Figura 37: Tipo de falla de cilindros de prueba estándar.

- a) De fisura
- b) De cortante (cono)
- c) De fisura y cortante (cono)

Tabla 64: Rotura de probetas para diferentes granulometrías.

ROTURA DE PROBETAS		
Granulometría: Ø=3/4"		
		

Muestra la probeta con falla por corte, a los 28 días.	Muestra la probeta con falla por corte, a los 28 días.	Muestra la probeta con fisuras encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados, a los 28 días.
--	--	--

Granulometría: Ø=1/2"



Muestra la probeta con falla de fisura y corte, a los 28 días.



Muestra la probeta con falla por corte, a los 28 días.



Muestra la probeta con falla de fisura, a los 28 días

Granulometría: Ø=3/8"



Muestra la probeta con falla de fisura, a los 28 días



Muestra la probeta con falla por corte, a los 28 días.

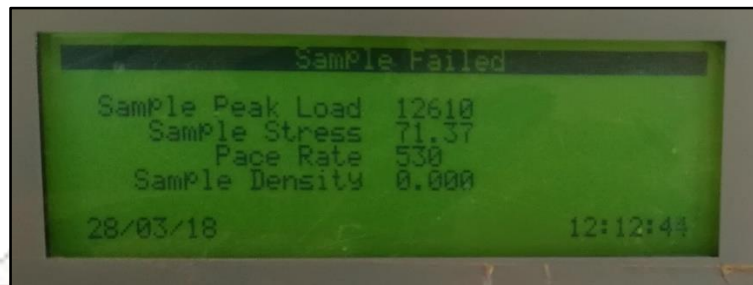


Muestra la probeta con falla de fisura y corte, a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia

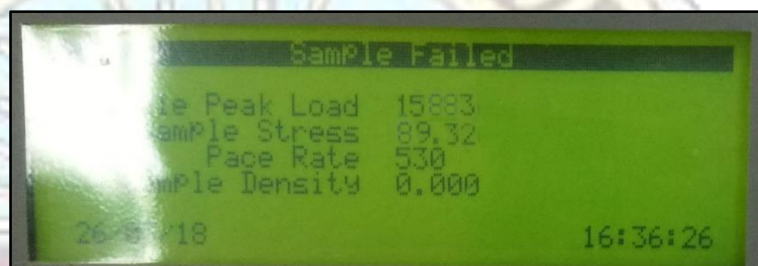
Resistencias a compresión registradas en la máquina de rotura de probetas:

Espécimen de Ø 3/8"



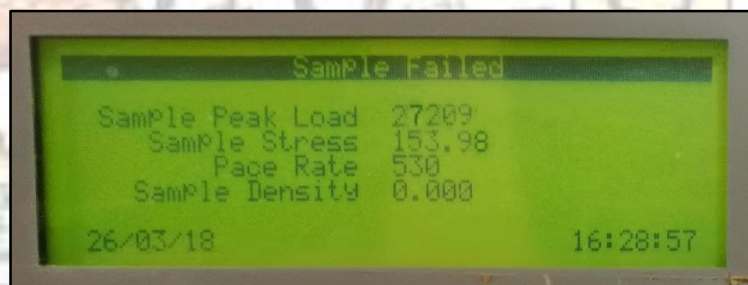
Fotografía 25: Captura del registro de resistencia a compresión de un espécimen de 3/8".

Espécimen de Ø 1/2"



Fotografía 26: Captura del registro de resistencia a compresión de un espécimen de 1/2".

Espécimen de Ø 3/4"



Fotografía 27: Captura de registro de resistencia a compresión.

Resistencia a Compresión Obtenido:

Tabla 65: Resultados de la resistencia a la compresión del Concreto Permeable

TAMAÑO DE AGREGADO	TESTIGO	f'c (kg/cm ²) 28 Días	f'c _{promedio} (kg/cm ²)
	CR ₁ - 3/8	73.85	
	CR ₂ - 3/8	76.42	
	CR ₃ - 3/8	71.37	
	CR ₄ - 3/8	70.87	

3/8	CR ₅ - 3/8	82.45	76.23
	CR ₆ - 3/8	78.36	
	CR ₇ - 3/8	80.56	
	CR ₈ - 3/8	75.96	
1/2	CR ₁ - 1/2	86.54	87.49
	CR ₂ - 1/2	84.19	
	CR ₃ - 1/2	88.55	
	CR ₄ - 1/2	90.48	
	CR ₅ - 1/2	85.96	
	CR ₆ - 1/2	89.32	
	CR ₇ - 1/2	86.12	
	CR ₈ - 1/2	88.74	
3/4	CR ₁ - 3/4	142.52	145.21
	CR ₂ - 3/4	148.75	
	CR ₃ - 3/4	155.57	
	CR ₄ - 3/4	140.18	
	CR ₅ - 3/4	153.98	
	CR ₆ - 3/4	138.45	
	CR ₇ - 3/4	145.87	
	CR ₈ - 3/4	136.32	

Fuente: Elaboración propia.

Interpretación: Como se puede observar en la tabla. La mayor resistencia a compresión promedio a los 28 días se da en el tamaño de agregado grueso de 3/4" con respecto a los de 1/2" y 3/8".



Figura 38: Comparación de la resistencia a compresión de los diferentes tamaños de agregado.

4.1.4. Ensayo de Coeficiente de Permeabilidad:

La metodología del ensayo fue desarrollada utilizando los métodos de prueba alternativos de la (ASTM – C09.49) y (ACI-522R.10); dónde nos sugiere elaborar muestras cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto, que fueron elaboradas utilizando la metodología para los especímenes de compresión. El ensayo de permeabilidad aplicable es un método de prueba alternativo normalizado por el ACI 522R-10 “Reporte en concreto permeable” y ASTM-C09.49 “Métodos de prueba alternativos”

En cuanto al cálculo del coeficiente de permeabilidad fue realizado utilizando la ley de Darcy:

$$K = \frac{L}{t} \times \frac{a}{A} \times \frac{h_1}{h_2}$$

Dónde:

K: Coeficiente de permeabilidad (cm/s)

L: Longitud de la muestra (cm)

A: Área de la muestra (cm²)

a: Área de la tubería de carga (cm²)

t: Tiempo de demora en pasar de h₁ a h₂ (seg)

h₁: Altura de columna de agua medida del nivel de referencia (cm)

h₂: Altura de tubería de salida del agua con respecto al nivel de referencia (cm).

Tabla 66: Número de muestras a utilizar en el ensayo de permeabilidad

Tamaño de A°G°	N° de probetas
3/8"	5
1/2"	5
3/4"	5
Total de probetas	15

Fuente: Elaboración Propia

Equipo utilizado

- Equipo de permeabilidad

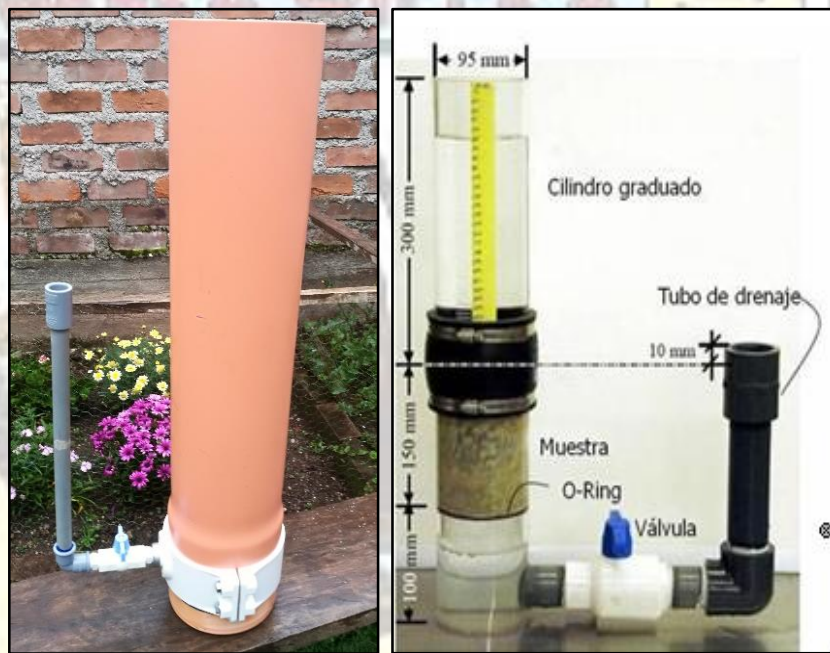
Descripción del proceso

- a) Una vez elaborado el permeámetro, adecuado esto a las dimensiones recomendadas de (15 x 30 cm), dónde la permeabilidad del concreto permeable fue medida por una sencilla caída de cabeza en el permeámetro como muestra la figura (ACI 522R-10). Usando este enfoque, la muestra se impermeabiliza debido a que la tubería se ajusta perfectamente al diámetro del espécimen, esto con la finalidad de evitar el flujo de agua a lo largo de los lados de la muestra.
- b) Posteriormente se añade agua en el cilindro graduado para llenar la celda de la muestra y la tubería de drenaje. La muestra se acondiciona previamente al permitir que el agua drene hacia afuera a través de la tubería hasta que el nivel en el cilindro graduado sea el mismo que la parte superior de la tubería de drenaje. Al realizar lo mencionado se reduce al mínimo el aire atrapado en la muestra y se asegura de que el espécimen este completamente saturado. Con la válvula cerrada, el cilindro graduado se llena con agua. Luego se abre la válvula y se registra el tiempo en segundos "t" que se requiere para que el agua caiga de una cabeza inicial h_1 a una cabeza final h_2 .
- c) En cuanto al equipo utilizado fue elaborado siguiendo las recomendaciones del (ACI-522R - 10) con las siguientes medidas.





Fotografía 28: Procedimiento de la elaboración del permeámetro.



a)

b)

Fotografía 29: Equipos de ensayo de permeabilidad.

a) Equipo realizado por los tesistas.

b) Equipo recomendado por el ACI 522



Fotografía 30: Procedimiento del uso del permeámetro para los diferentes especímenes de $\varnothing = 3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$.

Se muestra la obtención y el análisis de los resultados de coeficiente de permeabilidad, y su comparación en función al tipo de granulometría empleada: $3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$.

El coeficiente de permeabilidad del concreto permeable normalmente se encuentra en el rango de 0.14 a 1.22 cm/s. Los resultados obtenidos para todos los grupos de prueba se encuentran dentro del rango anteriormente descrito, por lo cual, se puede afirmar que todas las muestras de concreto permeable ensayadas cumplen con los requerimientos de permeabilidad.

El coeficiente de permeabilidad promedio hallado de las probetas de concreto permeable elaboradas con los agregados redondeados de $\varnothing = 3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$; provenientes de la Cantera de Callqui Chico, difieren respecto a su comportamiento permeable por su respectiva variación de tamaño. A

continuación, la **tabla 67** muestra los coeficientes de permeabilidad obtenidos, de acuerdo a las muestras realizadas para cada tamaño de agregado.

Tabla 67 Coeficiente de Permeabilidad del agregado grueso de $\phi = 3/8", 1/2"$ y $3/4"$.

TAMAÑO DE AGREGADO	TESTIGO	t(s)	t _{promedio} (s)	a (cm2)	A (cm2) (Diametro)	L (cm)	h1 (cm)	h2 (cm)	K (cm/s)	K _{promedio} (cm/s)
3/8"	CP ₁ - 3/8	120.00	120.67	182.41	180.27	31.00	30	1	0.884	0.840
		113.00								
		129.00								
	CP ₂ - 3/8	132.00	129.67	182.41	182.06	31.05	30	1	0.816	
		125.00								
		132.00								
	CP ₃ - 3/8	125.00	125.00	182.41	182.65	30.00	30	1	0.815	
		120.00								
		130.00								
	CP ₄ - 3/8	121.00	123.33	182.41	182.18	30.70	30	1	0.848	
		127.00								
		122.00								
	CP ₅ - 3/8	120.00	124.67	182.41	182.18	30.70	30	1	0.839	
		130.00								
		124.00								
½"	CP ₁ - 1/2	104.00	106.00	182.41	182.06	31.10	30	1	1	1.004
		108.00								
		106.00								
	CP ₂ - 1/2	103.00	104.67	182.41	179.67	30.45	30	1	1.005	
		106.00								
		105.00								
	CP ₃ - 1/2	103.00	107.00	182.41	179.32	31.12	30	1	1.006	
		108.00								
		110.00								
	CP ₄ - 1/2	103.00	105.00	182.41	179.79	30.60	30	1	1.006	
		106.00								
		106.00								
	CP ₅ - 1/2	108.00	105.33	182.41	179.79	30.60	30	1	1.002	
		106.00								
		102.00								
¾"	CP ₁ - 3/4	89.00	87.67	182.41	180.27	31.12	30	1	1.222	1.208
		88.00								
		86.00								
	CP ₂ - 3/4	88.00	87.33	182.41	183.85	31.20	30	1	1.206	
		86.00								
		88.00								
	CP ₃ - 3/4	84.00	87.00	182.41	185.06	31.10	30	1	1.198	
		89.00								
		88.00								
	CP ₄ - 3/4	88.00	88.33	182.41	184.46	31.15	30	1	1.186	
		88.00								

		89.00							
		85.00							
	CP ₅ - 3/4	87.00	85.33	182.41	184.46	31.15	30	1	1.228
		84.00							

Fuente: Elaboración propia

Interpretación:

- La permeabilidad del concreto permeable del agregado grueso de $\varnothing = 3/4"$ cuyo coeficiente de permeabilidad es 1.203 cm/s, varía considerablemente respecto del agregado de $\varnothing = 1/2"$ y $3/8"$, lo que conlleva a ser descrito como el más poroso, debido a la capacidad de filtración de agua a través de su estructura.
- La permeabilidad del concreto permeable del agregado grueso de $\varnothing = 3/8"$ cuyo coeficiente de permeabilidad es 0.841 cm/s, varía considerablemente respecto del agregado de $\varnothing = 1/2"$ y $3/4"$, lo que conlleva a ser descrito como el menos poroso, debido a la interconexión mínima que existe entre los agregados.



Figura 39: Diagrama comparativo del Coeficiente de Permeabilidad del Agregado Grueso de $\varnothing = 3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$.

4.2. Discusión

4.2.1. Análisis estadístico

Para obtener los datos del presente trabajo de investigación se ha tenido en cuenta muchos aspectos entre ellos la planificación, la validación y aplicación del instrumento, posteriormente se utilizó la herramienta del procesador de datos Excel para tabular la información que recogimos a través de la encuesta y luego se procesó los resultados:

Después de obtener los resultados se procedió a generar gráficos para poder interpretar los resultados del cuestionario, tomando en cuenta un análisis por dimensiones de la variable, para así lograr mi objetivo, generar las conclusiones respectivas por cada grafico enfocado a mi objetivo y hacer las recomendaciones respectivas.

Para la prueba de hipótesis se procederá a realizar la estadística inferencial y de particular la ANOVA de un factor, por ser variables cuantitativas de intervalo, cuya significancia es del 5% (95% de nivel de confianza).

4.2.2. Presentación e Interpretación de datos:

Se trabajó con dos dimensiones que fueron:

- **RESISTENCIA A COMPRESIÓN** (Concreto Permeable)
- **COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD** (Concreto Permeable)

Los cuales trabajaron con un tamaño de agregado de $\varnothing = 3/8", 1/2" \text{ y } 3/4"$.

4.2.2.1. Valoración de la Resistencia a Compresión del Concreto Permeable

Para analizar los resultados del proceso de investigación, se trabajó con un tamaño de agregado de $3/8", 1/2" \text{ y } 3/4"$. Para lo cual se obtuvo el histograma que a continuación se detalla.

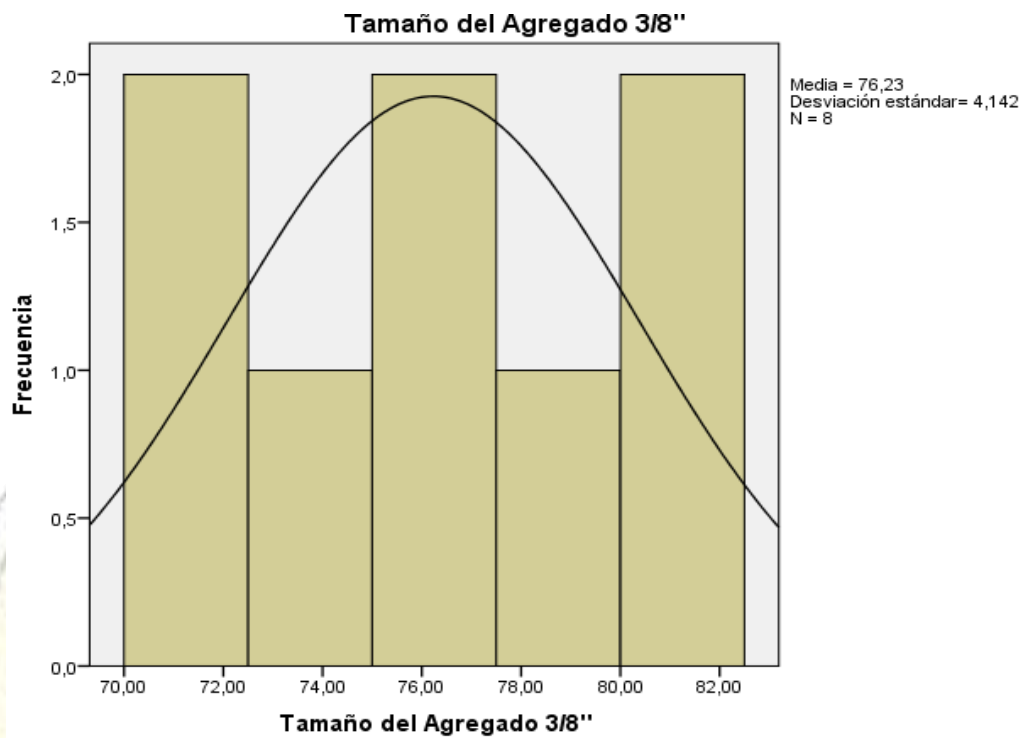


Figura 40: Histograma del resultado obtenido en la resistencia a compresión del concreto permeable de $\emptyset=3/8$ " (Base de datos SPSS).

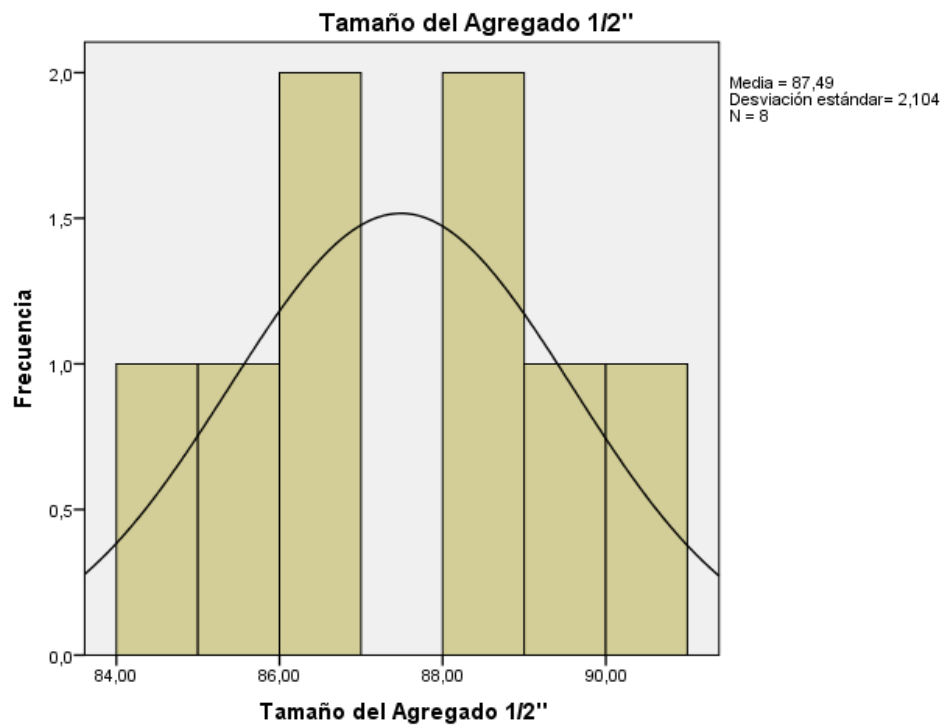


Figura 41: Histograma del resultado obtenido en la resistencia a compresión del concreto permeable $\emptyset=1/2$ " (Base de datos SPSS).

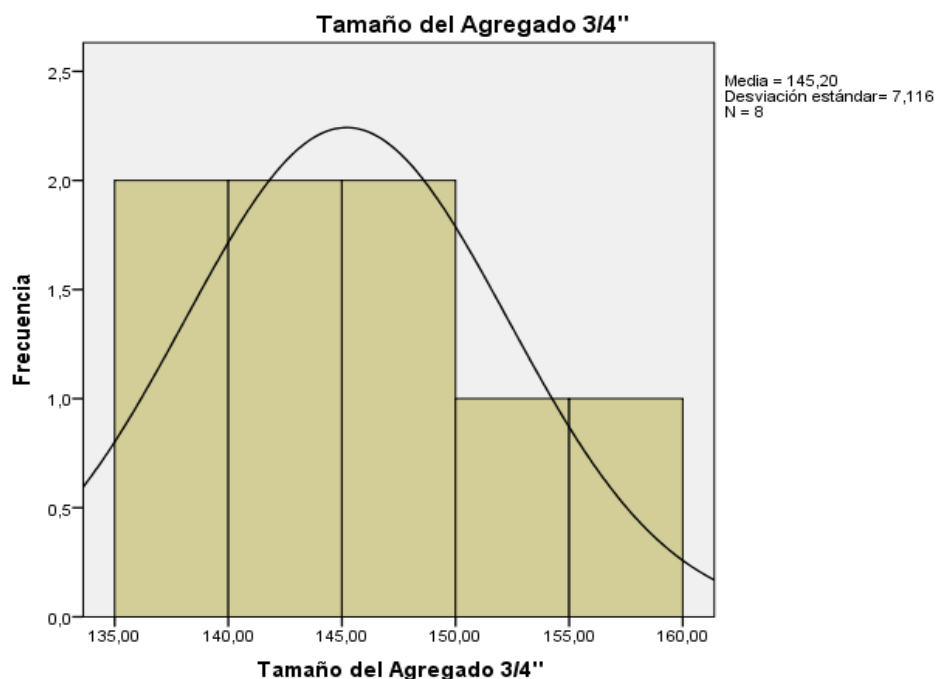


Figura 42: Histograma del resultado obtenido en la resistencia a compresión del concreto permeable (Base de datos SPSS).

Interpretación

Como podemos observar en los respectivos histogramas, tiene puntuaciones normales, pues en los extremos presentan frecuencias bajas y en la parte central frecuencias altas para los tres tipos de agregados. ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "), lo que significa que la cantidad de ensayos realizados son los necesarios para verificar la significancia del agregado en la Resistencia a la compresión del concreto permeable.

4.2.2.1.1. Logro Obtenido en la Resistencia a Compresión en los Tres Tipos de Agregados ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ")

Luego de haber obtenido el resultado del histograma por cada tipo de agregado, procederemos a realizar una comparación de los tres tipos de agregados, donde la figura 44, muestra el diagrama de caja de los tres tipos de agregados. ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "), donde se identifica la

distribución de las medianas obtenidas en el ensayo la resistencia a la compresión en los diferentes tipos de agregado

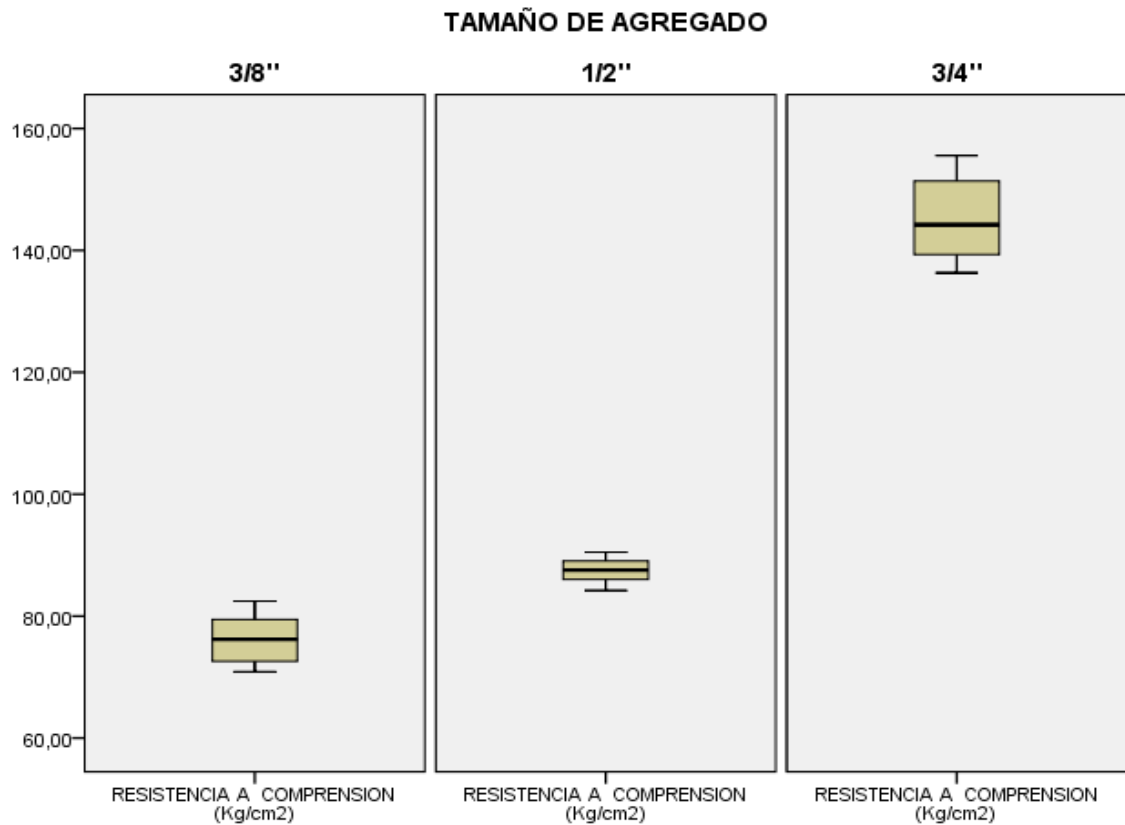


Figura 43: Diagrama de cajas del logro obtenido de resistencia a compresión del concreto permeable para los $\phi=3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$ (Base de datos SPSS).

Estadísticos				
		Tamaño del Agregado	Tamaño del Agregado	Tamaño del Agregado
		3/8	1/2	3/4
N	Válidos	8	8	8
	Perdidos	0	0	0
Media		76.2300	87.4875	145.2050
Mediana		76.1900	87.5450	144.1950
Moda		70.87 ^a	84.19 ^a	136.32 ^a
Desv. típ.		4.14206	2.10392	7.11614

Figura 44: Cuadro estadístico dónde se verifica que existen varias modas, dónde se mostrará el menor de los valores (Base de datos SPSS).

Interpretación

Se puede apreciar que la media obtenida por el agregado de 3/8" es de 76.23, el agregado de 1/2" es de 87.48 y por último la media del agregado de 3/4", fue de 145.20, lo cual indica que el mayor valor de la Resistencia a la Compresión se obtuvo con el agregado de 3/4", por ende, se procede a realizar una prueba de hipótesis que confirme que el agregado es el más óptimo para la Resistencia a Compresión del Concreto Permeable.

4.2.2.1.2. Prueba de Hipótesis de la Resistencia a Compresión

- Hipótesis nula (H_0)

La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu no mejora la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².

- Hipótesis alterna (H_1)

La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu mejora la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².

ANOVA de un factor					
RESISTENCIA A COMPRESION (Kg/cm ²)					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Muestra	21908.245	2	10954.122	455.015	.000
Error	505.558	21	24.074		
Total	22413.803	23			

Figura 45: Cuadro estadístico inferencial y de particular ANOVA de un factor (sig=5%)
(Base de datos SPSS)

Interpretación

- La obtención del N° de grados de libertad: 21, demuestra que la cantidad de especímenes realizados son suficientes para verificar la significancia del agregado en la Resistencia a la compresión del concreto permeable.
- Se aprecia que el nivel de significancia es de 0.000, el cual es menor a 0.05, respaldando de esta manera a la hipótesis alterna: "La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu mejora la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm²".
- Con los datos obtenidos de la figura 46 se procedió a verificar en la tabla: Límites unilaterales de F al nivel de 5% de probabilidad para el caso de $F > 1$, resultando que: Valor calculado (V_c) es mayor que el Valor de la Tabla (V_t), siendo $455.015 > 3.47$, por ende, se confirma nuevamente la hipótesis alterna.

Pruebas post hoc

Comparaciones múltiples

Variable dependiente: RESISTENCIA A COMPRESION (Kg/cm²)

	(I) TAMAÑO DE AGREGADO	(J) TAMAÑO DE AGREGADO	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD de Tukey	3/8	1/2	-11.25750*	2.45327	.000	-17.4411	-5.0739
		3/4	-68.97500*	2.45327	.000	-75.1586	-62.7914
	1/2	3/8	11.25750*	2.45327	.000	5.0739	17.4411
		3/4	-57.71750*	2.45327	.000	-63.9011	-51.5339
	3/4	3/8	68.97500*	2.45327	.000	62.7914	75.1586
		1/2	57.71750*	2.45327	.000	51.5339	63.9011

*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0.05.

Figura 46: Prueba de Post Hoc para validar la Resistencia a la comprensión del concreto permeable (Base de datos SPSS)

TAMAÑO DE AGREGADO		N	Subconjunto para alfa = 0.05		
			1	2	3
HSD de Tukey ^a	3/8	8	76.2300		
	1/2	8		87.4875	
	3/4	8			145.2050
	Sig.		1.000	1.000	1.000
Tukey B ^a	3/8	8	76.2300		
	1/2	8		87.4875	
	3/4	8			145.2050

Figura 47: Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos, dónde se usó el tamaño muestral de la media armónica = 8.000.

Interpretación

- Al ser evaluado en la prueba de HSD Tukey, en el post hoc, la resistencia a compresión, se obtuvo un nivel de significancia de 0.000, el cual es menor a 0.05, indicando una diferencia significativa entre los tres tipos de agregados (3/8", 1/2" y 3/4").
- Por tanto, de acuerdo a la comparación de medias se determinó que el agregado grueso de Ø=3/4 alcanzó mayor resistencia a la compresión con respecto a los agregados grueso de 1/2" y 3/8".

Discusión

- Referente a la resistencia a compresión, se observó que el tamaño de agregado de 3/4" fue el más óptimo llegando a un **f'c = 145.21 Kg/cm²** en cuanto a los otros tamaños de agregado, esto coincide con respecto a lo hallado por **Pérez (2009)** quien obtuvo una mejor resistencia a compresión utilizando agregado de 3/4", con una relación de a/c de 0.35, adicionando un 10% de agregado fino y un porcentaje de vacíos de 15% y una dosis de cemento de 350 Kg/m³, con esta dosificación llegaron a una resistencia a compresión en promedios cercanas a **f'c = 215 Kg/cm²**.

- Sin embargo con la investigación de **Barahona y Martínez (2013)**, difieren en los resultados, ya que ellos obtuvieron una resistencia a compresión ideal para superficies de baja intensidad de carga con el agregado grueso de tamaño nominal de 3/8" de las canteras: El Carmen, Aramuaca y La Pedrera.

4.2.2.2. Valoración del Coeficiente de Permeabilidad del Concreto Permeable

Para analizar los resultados del proceso de investigación, se trabajó con un tamaño de agregado de $\varnothing = 3/8, 1/2$ y $3/4$. Para lo cual se obtuvo el histograma que a continuación se detalla.

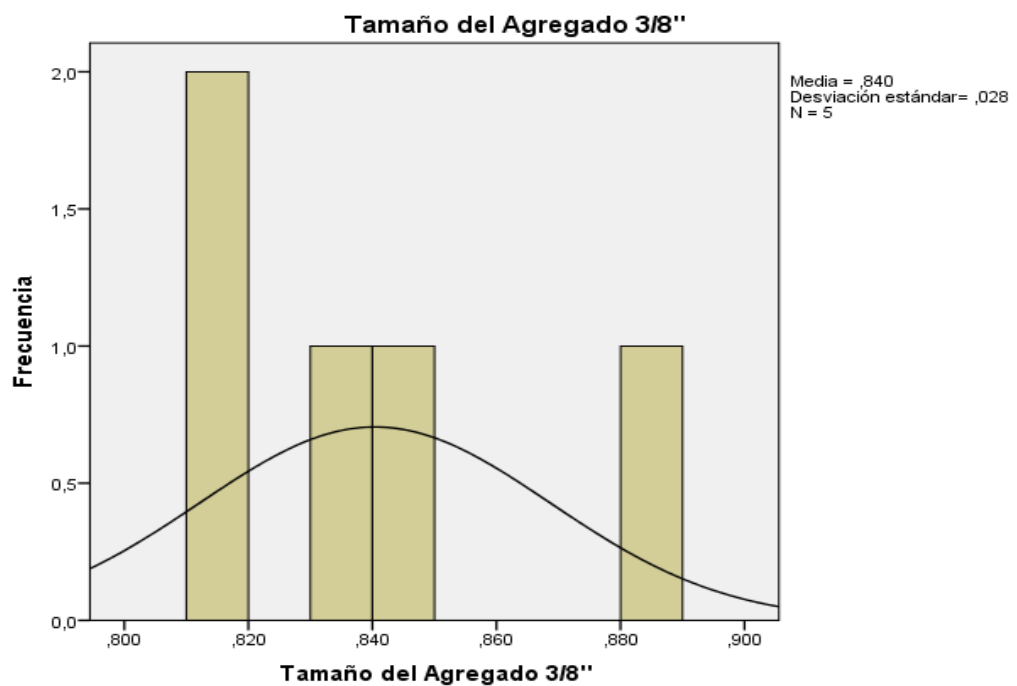


Figura 48: Histograma del resultado obtenido de los resultados del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable de $\varnothing = 3/8$ " (Base de datos SPSS).

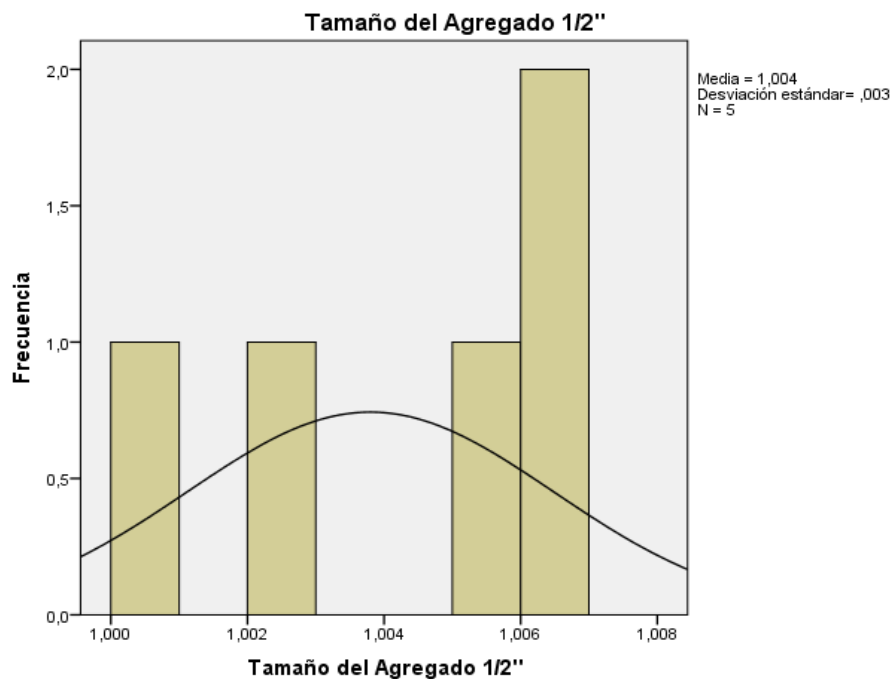


Figura 49: Histograma del resultado obtenido de los resultados del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable de $\varnothing=1/2"$ (Base de datos SPSS).

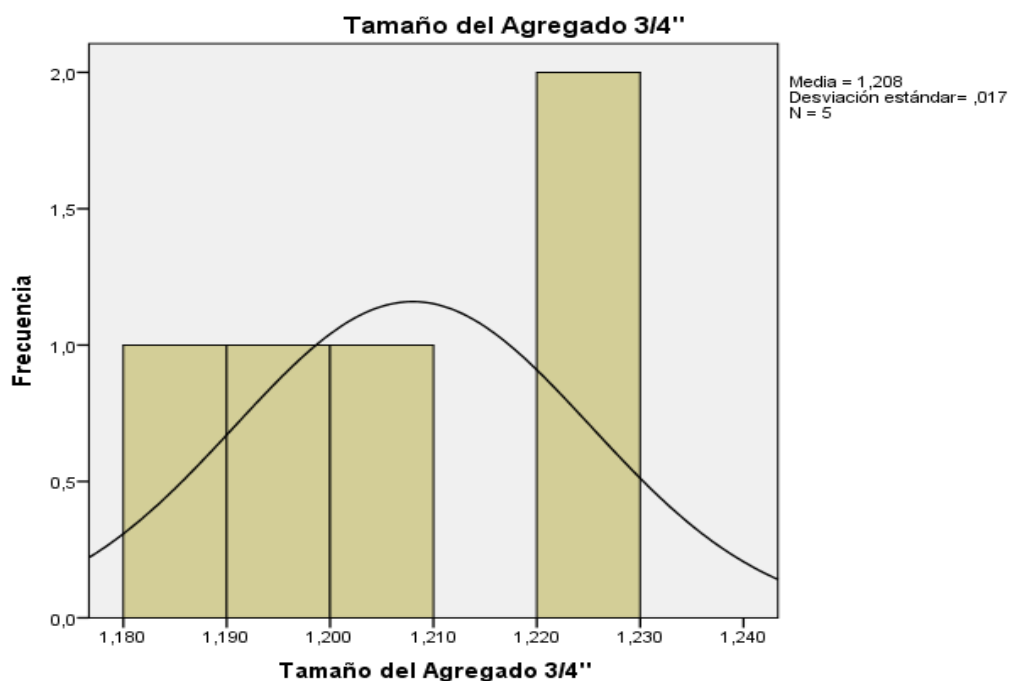


Figura 50: Histograma del resultado obtenido de los resultados del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable de $\varnothing=3/4"$ (Base de datos SPSS).

Interpretación

Como podemos observar en los respectivos histogramas, tiene puntuaciones normales, pues en los extremos presentan frecuencias bajas y en la parte central frecuencias altas para los tres tipos de agregados. ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "), lo que significa que la cantidad de ensayos realizados son los necesarios para verificar la significancia del agregado en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable.

4.2.2.2.1. Logro Obtenido en el Coeficiente de Permeabilidad en los Tres Tipos de Agregados ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ ").

Luego de haber obtenido el resultado del histograma por cada tipo de agregado, procederemos a realizar una comparación de los tres tipos de agregados, donde la figura 44, muestra el diagrama de caja de los tres tipos de agregados. ($\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{4}$ "), donde se identifica la distribución de las medianas obtenidas en el ensayo del coeficiente de permeabilidad en los diferentes tipos de agregado

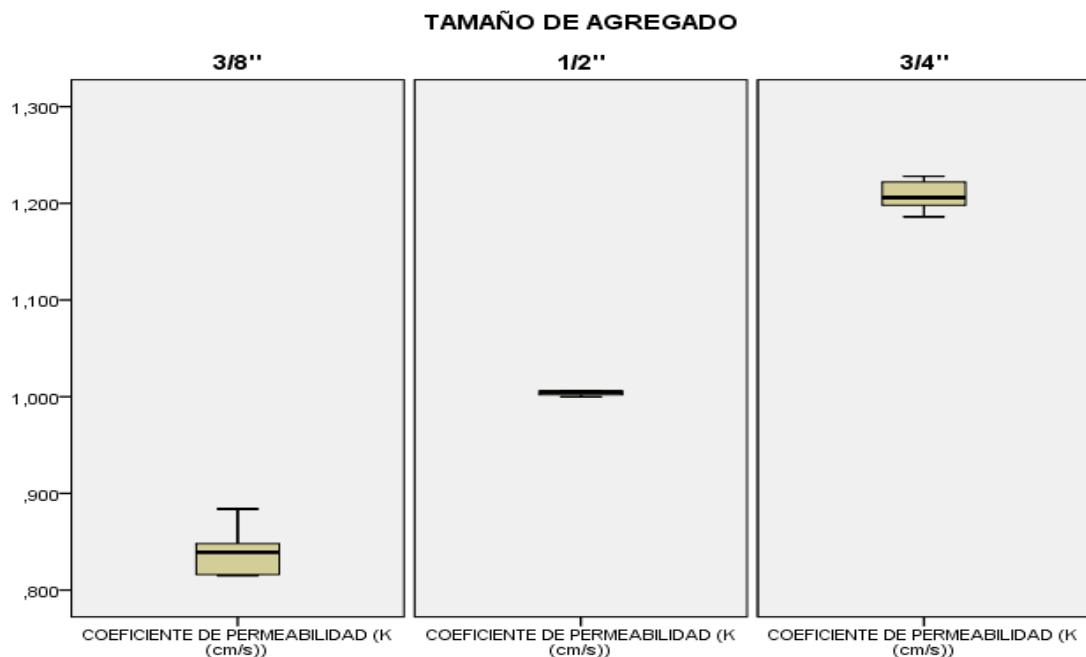


Figura 51: Diagrama de cajas del logro obtenido de los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad del concreto permeable (Base de datos SPSS).

Estadísticos

		Tamaño del Agregado 3/8"	Tamaño del Agregado 1/2"	Tamaño del Agregado 3/4"
N	Válidos	5	5	5
	Perdidos	0	0	0
Media		.84040	1.00380	1.20800
Mediana		.83900	1.00500	1.20600
Moda		.815 ^a	1.006	1.186 ^a
Desv. típ.		.026290	.002683	.017205

Figura 52: Cuadro estadístico dónde se verifica que existen varias modas, dónde se mostrará el menor de los valores (Base de datos SPSS).

Interpretación

Se puede apreciar que la media obtenida por el agregado de 3/8" es de 0.84, el agregado de 1/2" es de 1.00 y por último la media del agregado de 3/4", fue de 1.21, lo cual indica un mayor coeficiente de permeabilidad, en el agregado de 3/4", por lo que se procede a realizar una prueba de hipótesis que confirme que el agregado es el

indicado para la obtención de un coeficiente de permeabilidad adecuado o aceptable.

4.2.2.2. Prueba de hipótesis de coeficiente de permeabilidad del Concreto Permeable

- Hipótesis nula (H_0)

La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu no incrementa el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².

- Hipótesis alterna (H_1)

La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu incrementa el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm².

ANOVA de un factor					
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K(cm/s))					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	.339	2	.170	461.094	.000
Intra-grupos	.004	12	.000		
Total	.344	14			

Figura 53: Figura 44: Cuadro estadístico inferencial y de particular ANOVA de un factor (sig=5%) (Base de datos SPSS)

Interpretación:

- La obtención del N° de grados de libertad: 12, demuestra que la cantidad de especímenes realizados son suficientes para verificar la significancia del agregado en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable.
- Se aprecia que el nivel de significancia es de 0.000, el cual es menor a 0.05, respaldando de esta manera a la hipótesis alterna: "La granulometría del agregado grueso

de la cantera del río Ichu incrementa el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito $f'c$ 175kg/cm²".

- Con los datos obtenidos de la figura 54 se procedió a verificar en la tabla: Límites unilaterales de F al nivel de 5% de probabilidad para el caso de $F > 1$, resultando que: Valor calculado (V_c) es mayor que el Valor de la Tabla (V_t), siendo $461.094 > 3.89$, por ende, se confirma nuevamente la hipótesis alterna

Comparaciones múltiples							
Variable dependiente: COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K(cm/s))							
	(I) TAMAÑO DE AGREGADO	(J) TAMAÑO DE AGREGADO	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	3/8"	1/2"	-,163400*	,012130	,000	-,19576	-,13104
		3/4"	-,367600*	,012130	,000	-,39996	-,33524
	1/2"	3/8"	,163400*	,012130	,000	,13104	,19576
		3/4"	-,204200*	,012130	,000	-,23656	-,17184
	3/4"	3/8"	,367600*	,012130	,000	,33524	,39996
		1/2"	,204200*	,012130	,000	,17184	,23656

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Figura 54: Prueba de Post Hoc para validar el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable (Base de datos SPSS).

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K(cm/s))

TAMAÑO DE AGREGADO		N	Subconjunto para alfa = 0.05		
			1	2	3
HSD de Tukey ^a	3/8"	5	.84040		
	1/2"	5		1.00380	
	3/4"	5			1.20800
	Sig.		1.000	1.000	1.000
Tukey B ^a	3/8"	5	.84040		
	1/2"	5		1.00380	
	3/4"	5			1.20800

Figura 55: Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos, donde se usó el tamaño muestral de la media armónica = 5.000

Interpretación

- Al ser evaluado en la prueba de HSD Tukey, en el post hoc, el coeficiente de permeabilidad, se obtuvo un nivel de significancia de 0.000, el cual es menor a 0.05, indicando una diferencia significativa entre los tres tipos de agregados ($3/8''$, $1/2''$ y $3/4''$).
- Por tanto, de acuerdo a la comparación de medias se determinó que el agregado grueso de $\emptyset=3/4$ alcanzó mayor coeficiente de permeabilidad con respecto a los agregados grueso de $1/2''$ y $3/8''$.

Discusión

- Para que un concreto sea considerado como permeable su coeficiente de permeabilidad debe encontrarse dentro del rango definido por el reporte ACI 5222 R-10, el cual es 0.14 a 1.22 cm/s. Los resultados de las pruebas de permeabilidad de esta investigación con un promedio de 1.02 cm/s, permiten concluir que todos los testigos elaborados cumplen con los requisitos de permeabilidad mínimos establecidos, considerándose de esta manera que el agregado grueso TMN de $3/4''$ fue quién mejoró las propiedades de permeabilidad, alcanzado un valor de **1.208 cm/s** en relación a los otros tamaños de agregado, esto coincide con lo señalado en **Flores y Pamcopia (2015)** quienes afirman que “todas las muestras de concreto permeable ensayadas cumplen con los requerimientos de permeabilidad”, dónde el agregado redondeado proveniente de la Cantera Cutimbo – Huso TMN 1” presentó un mejor comportamiento.

4.2.3. Análisis de Costo

Un aspecto importante en el desarrollo de cualquier construcción es el relacionado con lo económico. Si una solución en particular de un proyecto requiere costos excesivos, se buscará una solución que proporcione costos no tan elevados.

En el caso del concreto permeable, es importante considerar el beneficio ecológico que proporciona, y considerarlo al momento de analizar económicamente un proyecto en donde sea utilizado este material para poder verificar si el material resulta ser rentable.

En la tabla 67, se muestra los costos del agregado fino y grueso en la ciudad de Huancavelica (Precios actualizados 2018)

Tabla 68: Costo del agregado fino y grueso en la ciudad de Huancavelica

Tipo de material	Cantidad	Costo (s/.)
Agregado fino	1	S/160.00
Agregado grueso TM 1°	1	S/90.00

Fuente: Elaboración propia

Como se busca tener un material que sea utilizado en la construcción de un pavimento de bajo tránsito, que reduzca la cantidad de uso de los materiales que lo componen, se desarrolló un análisis comparativo de los costos que involucra la ejecución de una base de concreto para una resistencia de $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ utilizando el concreto convencional y el permeable.

A su vez se consideró el análisis comparativo de costos, para una base de concreto convencional y permeable de una resistencia de $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$, con la finalidad de conocer el comportamiento económico de la máxima resistencia a la compresión obtenida en el presente proyecto.

Tabla 69: Análisis de Costos Unitarios para una base de Concreto Convencional $f'c = 140$ kg/cm²

BASE DE CONCRETO CONVENCIONAL $F'C=140$ KG/CM ² .	UNIDAD DE MEDIDA:	M3
	RENDIMIENTO:	10

I. EQUIPO

Código	Descripción	Unid	Cuadrilla	Cantidad	Precio unitario	Costo
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	34.66	1.73
	MEZCLADORA DE CONCRETO 11P3 (23 HP)	hm	1.0000	0.8000	25.00	20.00
SUB TOTAL:						S/21.73

II. MATERIALES

Código	Descripción	Unid	Cuadrilla	Cantidad	Precio unitario	Costo
	AGREGADO FINO	m3		0.4700	160.00	75.20
	AGREGADO GRUESO	m3		0.9300	90.00	83.70
	CEMENTO PORTLAND TIPO I (42.5 KG)	m3		7.000	25.50	178.50
	AGUA PUESTA EN OBRA	m3		0.1256	5.00	0.63
SUB TOTAL:						S/338.03

III. MANO DE OBRA

Código	Descripción	Unid	Cuadrilla	Cantidad	Precio unitario	Costo
	OPERARIO	Hh	1.0000	0.8000	16.82	13.46
	OFICIAL	Hh	1.0000	0.8000	13.95	11.16
	PEÓN	Hh	1.0000	0.8000	12.55	10.04
SUB TOTAL:						S/34.66

TOTAL ANÁLISIS S/394.42

Fuente: Elaboración propia

Tabla 70: Análisis de Costos Unitarios para una base de Concreto Permeable $f'c = 140$ kg/cm²

BASE DE CONCRETO PERMEABLE $F'C=140$ KG/CM ² .	UNIDAD DE MEDIDA:	M3
	RENDIMIENTO:	10

I. EQUIPO

Código	Descripción	Unid	Cuadrilla	Cantidad	Precio unitario	Costo
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.0000	34.66	1.73
	MEZCLADORA DE CONCRETO 11P3 (23 HP)	hm	1.0000	0.8000	25.00	20.00
SUB TOTAL:						21.73

II. MATERIALES

Código	Descripción	Unid	Cuadrilla	Cantidad	Precio unitario	Costo
	AGREGADO FINO	m3		0.0580	160.00	9.28
	AGREGADO GRUESO	m3		0.5220	90.00	46.98
	CEMENTO PORTLAND TIPO I (42.5 KG)	m3		7.0000	25.50	178.50
	AGUA PUESTA EN OBRA	m3		0.1060	5.00	0.53
SUB TOTAL:						235.29

III. MANO DE OBRA

Código	Descripción	Unid	Cuadrilla	Cantidad	Precio unitario	Costo
	OPERARIO	Hh	1.0000	0.8000	16.82	13.46
	OFICIAL	Hh	1.0000	0.8000	13.95	11.16
	PEÓN	Hh	1.0000	0.8000	12.55	10.04
SUB TOTAL:						34.66

TOTAL ANÁLISIS S/291.68

Fuente: Elaboración propia

- Para un metro cúbico de base de concreto convencional de $f'c = 140$ kg/cm², el costo será de S/. 394.42 soles.
- Para un metro cúbico de base de concreto permeable de $f'c = 140$ kg/cm², el costo será de S/. 291.68 soles.
- Por tanto, existe una variación de costo de: S/. 102.74 soles.

Por lo tanto; para un metro cúbico de base de concreto, utilizando el Concreto Permeable resulta ser más económico que una base de Concreto Convencional.

CONCLUSIONES

En Huancavelica, actualmente no existe ningún tipo de investigación relacionado al estudio del concreto permeable, por lo que la presente tesis, servirá como antecedente a los estudios posteriores, a fin de recabar mayor información que involucre su ejecución.

La utilización del agregado grueso de la cantera del río Ichu ($\emptyset=3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$) en el diseño de mezcla del Concreto Permeable diseñado para pavimentos de bajo tránsito $f_c=175$ kg/cm² en la ciudad de Huancavelica, mejora las propiedades del mismo,

El agregado grueso de tamaño de $3/4"$, resultó con un promedio de 145.21 kg/cm² en la resistencia a la compresión, siendo este el que alcanzó mayor resistencia para el uso de pavimentos de bajo tránsito, donde el valor obtenido se encuentra en el rango de 28.55 kg/cm² a 285.51 kg/cm² según lo establece la Norma ACI 522 R -10.

Los resultados obtenidos de los ensayos del coeficiente de permeabilidad, se encuentran dentro del rango 0.14 cm/s a 1.22 cm/s según lo establece la Norma ACI 522 R -10, por lo que podemos concluir que todos los especímenes se encuentran dentro del rango, siendo el agregado grueso de $3/4"$, la que presenta mejor capacidad de infiltración.

Los resultados del ANOVA confirman la influencia significativa que tiene el agregado grueso de la cantera del río Ichu en la resistencia a la compresión del Concreto Permeable, debido a que se aprecia que el nivel de significancia es de 0.000, el cual es menor a 0.05, a su vez se procedió a verificar en la tabla: Límites unilaterales de F al nivel de 5% de probabilidad para el caso de $F>1$, resultando que: Valor calculado (V_c) es mayor que el Valor de la Tabla (V_t), siendo $455.015>3.47$, por ende, se confirma nuevamente la hipótesis alterna.

Los resultados del ANOVA confirman la influencia significativa que tiene el agregado grueso de la cantera del río Ichu en el coeficiente de permeabilidad del Concreto Permeable, debido a que nivel de significancia es de 0.000, el cual es menor a 0.05, a su vez se procedió a verificar en la tabla: Límites unilaterales de F al nivel de 5% de probabilidad para el caso de $F>1$, resultando que: Valor calculado (V_c) es mayor que el Valor de la Tabla (V_t), siendo $461.094>3.89$, por ende, se confirma nuevamente la hipótesis alterna.

En cuanto a los costos económicos se estimó que, en un metro cúbico de base de concreto, utilizando el Concreto Permeable resulta ser más económico que una base de Concreto Convencional, por la menor cantidad de agregado fino utilizado y la adecuada relación a/c consentida.



RECOMENDACIONES

En conformidad a lo concluido por la presente investigación y para futuras investigaciones que trabajen con este tipo de material, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Para el diseño de mezclas se recomienda utilizar los métodos propuestos en el ACI 211.3R – 02 “Guía para el proporcionamiento del concreto de cero Slump”, y el ACI 522R-10 “Reporte en Concreto Permeable”
- Se recomienda que, en la ciudad de Huancavelica, se emplee agregados gruesos de tamaño $\frac{3}{4}$ ” en el diseño de mezcla, puesto que han demostrado brindar mejores resultados en lo que respecta a la Resistencia a la Compresión y de Permeabilidad.
- Para un adecuado proceso de mezclado del concreto permeable, se recomienda lo siguiente: Vaciar en la mezcladora parte del agua de diseño, seguido del agregado grueso y fino (si fuese necesario), luego el cemento para finalmente el agua restante. Además, se debe tener en cuenta que el agua debe ser añadida en forma progresiva, debido a que una mínima cantidad de agua generará una mezcla sin consistencia, lo que ocasiona una baja resistencia a la compresión, mientras que una cantidad excesiva de agua, provocará que la pasta selle los poros de la mezcla disminuyendo su capacidad de infiltración.
- Se recomienda estudiar el empleo de otros materiales añadidos en el diseño de mezcla del concreto permeable, como un aditivo incorporador de aire u otro compuesto que permita verificar la viabilidad técnica y económica de su incorporación para mejorar la resistencia a la compresión.
- Tras la irregularidad del acabado de los testigos de concreto permeable para realizar el ensayo de Resistencia a la Compresión, se recomienda tarrajear con mortero (agregado fino y cemento), ya que la distribución de la fuerza aplicada en los especímenes no es uniforme con la utilización de Neopreno, provocando fallas locales.
- También se recomienda el estudio del coeficiente de permeabilidad en las diferentes direcciones que presenta el flujo del agua a causa de las precipitaciones pluviales tanto en sentido “X” y “Y”, ya que en la presente investigación solo se realizó en el sentido “Z”.

- Ya que no se obtuvo la resistencia a compresión requerida f_c 175 kg/cm², se recomienda realizar investigaciones con diferentes tipos de diseños de mezcla considerando el porcentaje de vacíos, relación a/c y procedencia del agregado grueso.



Referencia Bibliográfica

- ACI2113R. (1988). *Guide for selecting proportions for no-slump concrete. Appendix 7 Pervious concrete mix proportioning*. 211.3R-21. American Concrete Institute.
- ACI522R-10. (2010). *Report on Pervious Concrete*.
- ACI522R-6. (2006). *Pervious Concrete*. American Concrete Institute.
- ASTM-C09.49. (s.f.). *Método de Prueba Alternativos para el concreto permeable*. ASTM International.
- ASTM-D448. (2012). *Clasificación estandar de tamaño de agregado para la construcción de caminos y puentes*. ASTM internacional.
- Barahona, R., Martinez, M., & Zelaya, S. (2013). *Comportamiento del concreto permeable utilizando agregado grueso de la cantera, el Carmen, Aramuaca y la Pedrera, de la zona oriental de el Salvador, San Miguel*. San Miguel: El Salvador. Recuperado el 28 de Enero de 2017
- Brundell, R. (10 de Abril de 2006). *Concreto permeable al agua*. Recuperado el 2017 de Enero de 14, de Cemex:
http://www.bnamericas.com/es/news/infraestructura/Cemex_presenta_nuevo_concreto_permeable_al_agua
- Castro, M. (2011). *Pavimentos permeables con alternativa de drenaje urbano*. Bogotá, Colombia.
- Felipe, Y., & Castañeda, L. (2014). *Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos*. Santiago de Calí, Colombia.
- Fernandez, R., & Navas, A. (2008). *Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad*. San José, Costa Rica.
- Flores, C., & Pacompia, I. (2015). *Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras de plástico para pavimentos f/c 175 kg/cm² en la ciudad de Puno*. Puno, Perú.
- Gonzales, A., Oseda, D., Felisicimo, & Gave, J. (2011). *Aprender y enseñar investigación científica*. Huancavelica, Perú: Biblioteca Nacional del Perú.
- Gonzales, A., Oseda, D., Ramirez, F., & Gave, J. (2011). *Aprender y a enseñar investigación científica*. Huancavelica, Perú: Biblioteca Nacional del Perú.
- Kamali, M., Delkash, M., & Tajrishy, M. (2016). *Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff*. Tehran, Irán.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.027>

- Kim, Y., Gaddafi, A., & Yoshitake, I. (2016). *Permeable concrete mixed with various admixtures*. Colorado. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.109
- Lian, C., & Zhuge, Y. (2010). *Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation*. Adelaide: ELSEVIER.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057
- NTP_400.012. (s.f.). *Análisis granulométrico del agregado fino y grueso global*. Norma Técnica Peruana.
- NTP_400.021. (2002). *Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción de agregado grueso*. Norma Técnica Peruana.
- Pérez, D. (2009). *Estudio experimental del concreto permeable con agregado andesíticos*. México, México.
- Sánchez, H., & Reyes, C. (2009). *Metodología y Diseño en la Investigación Científica*. Lima: Visión Universitaria.
- Sañudo, Á. (2014). *Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones*. Santander.
- SENAMHI. (2015). *Registro histórico de precipitaciones pluviales en la ciudad de Huancavelica (1990-2014)*. Huancavelica, Perú.
- Torres, E. (2010). *Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción*. México, México.

ANEXOS

- ANEXO 01:** Acontecimientos suscitados respecto a las inundaciones provocado por el incremento inusual de la precipitación pluvial, en los barrios de Yananaco, San Cristóbal, Santa Ana y el distrito de Ascensión de la ciudad de Huancavelica.
- ANEXO 02:** Extracción del agregado grueso de la cantera de río Ichu (Callqui Chico).
- ANEXO 03:** Resultados del ensayo a la resistencia a la compresión del concreto permeable.
- ANEXO 04:** Constancia de uso del laboratorio de Ensayo de Materiales y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica de la Universidad Nacional de Huancavelica
- ANEXO 05:** Norma ACI 211. 3R-02, (1988) “GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE PROPORCIONES PARA CONCRETO DE CERO SLUMP.

The logo of the Universidad Nacional de Huancavelica is a circular emblem. It features a central shield with a sun rising over a mountain range, flanked by a llama on the left and a person on the right. The shield is set against a background of a sunburst. The text "UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA" is written in a circular path around the shield, and "PERU" is at the bottom.

ANEXO I: Acontecimientos suscitados en la región Huancavelica, en cada uno de los barrios y el distrito de Ascensión.

ANEXO 01: Acontecimientos suscitados en la región Huancavelica, en cada uno de los barrios y el distrito de Ascensión



Ilustración 1: Principales ocurrencias de inundaciones en el **distrito de Ascensión**, acontecido en la estación de invierno, periodo comprendido entre diciembre y abril del 2018.

a. Colmatación y desborde de la caja de drenaje, **b.** Colmatación y crecida de vegetación en la cuneta, la cual obstruye el paso del agua. **c y d.** acumulación de agua contaminada

sobre el pavimento. **e y f.** inundación y acumulación de agua contaminada (aguas servidas) en la superficie del pavimento provocado por la colmatación y posterior desborde del buzón.



Ilustración 2: Principales ocurrencias de inundaciones en el **barrio de Santa Ana**, acontecido en la estación de invierno, periodo comprendido entre diciembre y abril del 2018.

a. Colmatación de cuneta, **b.** Acumulación de agua contaminada y material sólido de arrastre. **c.** desborde de caja de drenaje **d y e.** Colmatación de cuneta por el elevado crecimiento inusual de la precipitación **f.** desborde de caja de drenaje



Ilustración 3: Principales ocurrencias de inundaciones en el **barrio de San Cristóbal**, acontecido en la estación de invierno, periodo comprendido entre diciembre y abril del 2018.

a. Colmatación de cuneta, **b.** Saturación y desborde de caja de drenaje. **c.** Colmatación de cuneta y acumulación de agua sobre la superficie del pavimento **d y e.** Colmatación por material de arrastre de la cuneta, **f.** Desborde de precipitación pluvial hacia gradería existente.

ANEXO II: EXTRACCIÓN DE
AGREGADO GRUESO DE LA CANTERA
DEL RÍO ICHU (CALLQUI CHICO).



Ilustración 4: Extracción del agregado grueso de la Cantera del río Ichu (Callqui Chico), margen derecho.

The logo of the Universidad Nacional de Huancavelica, Peru, is a circular emblem. It features a yellow outer ring with the text "UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA" and "PERU" at the bottom. Inside the ring is a blue and white sunburst design with the text "WANKA WILLKA" below it. The central part of the logo depicts a mountain landscape with a river and a small building.

ANEXO III: Resultados del ensayo a la resistencia a la compresión del concreto permeable.

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

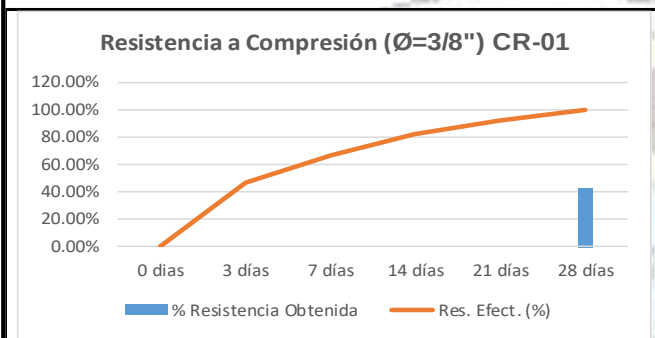


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	13050.03	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	73.85	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	73.85	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	42.20	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

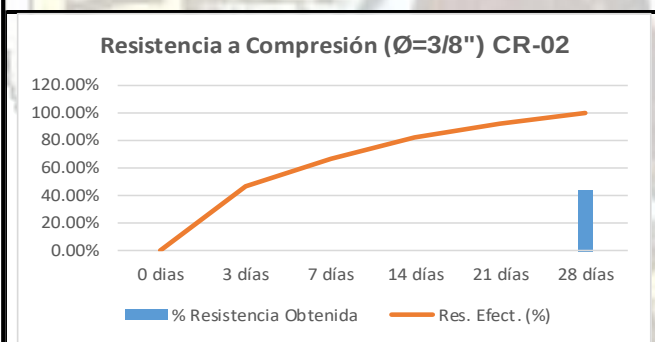


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	13504.18	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	76.42	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	76.42	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	43.67	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

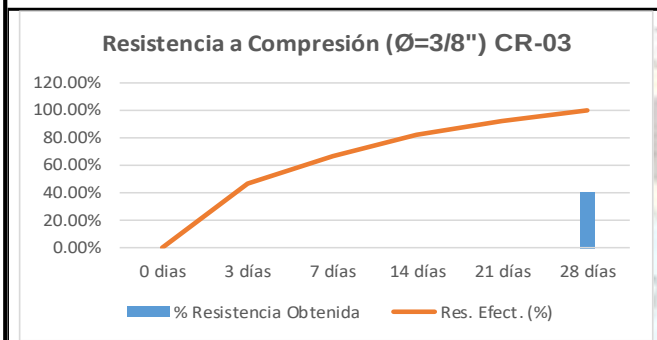


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	12611.79	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm2)	176.71	cm2
Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	71.37	Kg/cm2

Resistencia última (Kg/cm2)	71.37	Kg/cm2
Resistencia buscada (Kg/cm2)	175	Kg/cm2
% Resistencia Obtenida	40.78	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

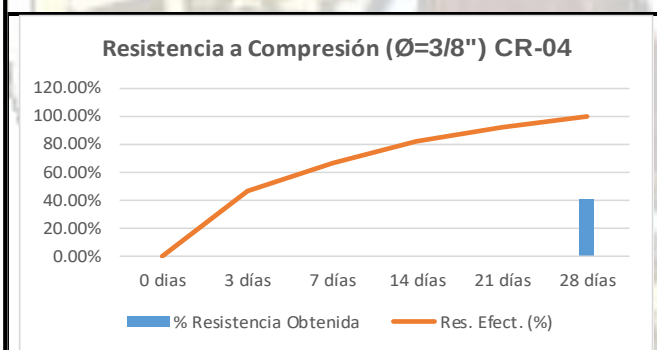


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	12523.44	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm2)	176.71	cm2
Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	70.87	Kg/cm2

Resistencia última (Kg/cm2)	70.87	Kg/cm2
Resistencia buscada (Kg/cm2)	175	Kg/cm2
% Resistencia Obtenida	40.50	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

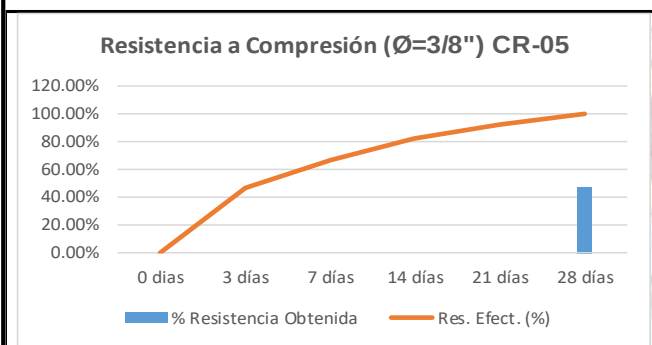


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	14569.74	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	82.45	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	82.45	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	47.11	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

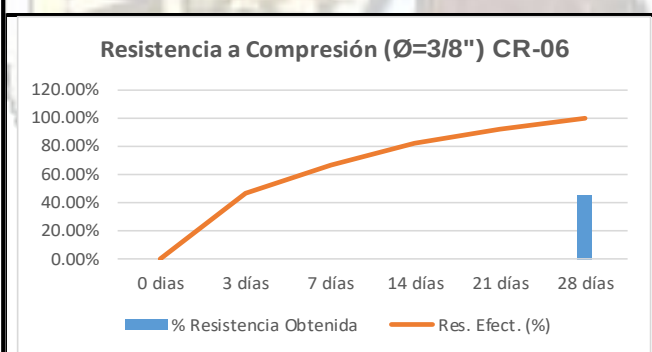


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	13847.00	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	78.36	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	78.36	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	44.78	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

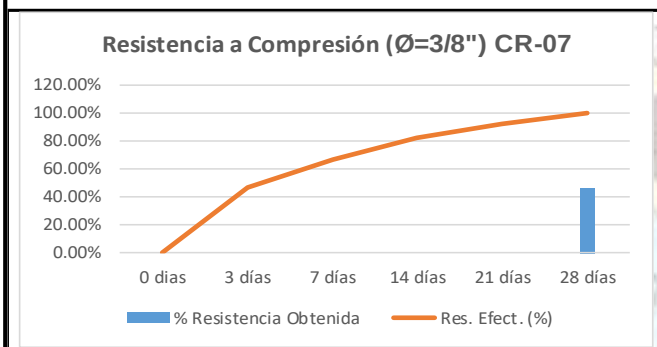


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	14235.76	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm2)	176.71	cm2
Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	80.56	Kg/cm2

Resistencia última (Kg/cm2)	80.56	Kg/cm2
Resistencia buscada (Kg/cm2)	175	Kg/cm2
% Resistencia Obtenida	46.03	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	27/02/2018
FECHA DE ROTURA:	27/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

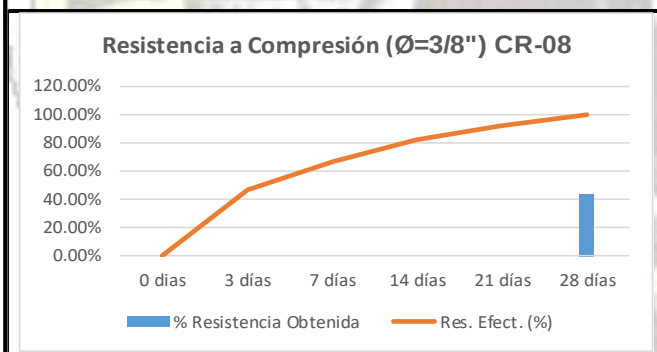


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	13422.89	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm2)	176.71	cm2
Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	75.96	Kg/cm2

Resistencia última (Kg/cm2)	75.96	Kg/cm2
Resistencia buscada (Kg/cm2)	175	Kg/cm2
% Resistencia Obtenida	43.41	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

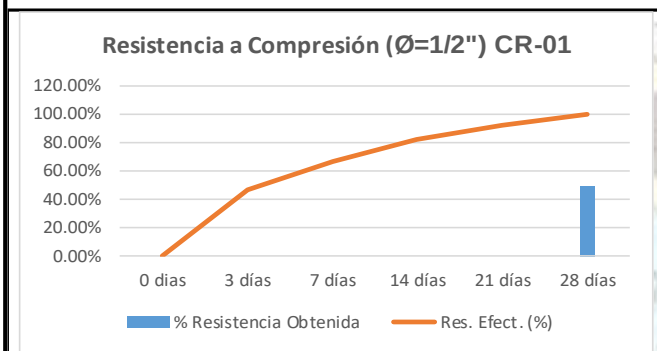


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15292.48	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	86.54	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	86.54	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	49.45	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

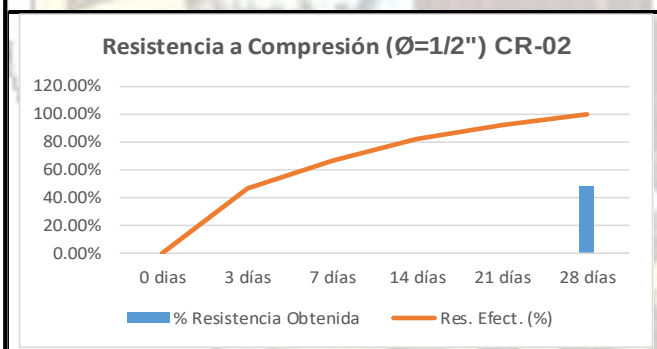


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	14877.21	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	84.19	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	84.19	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	48.11	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

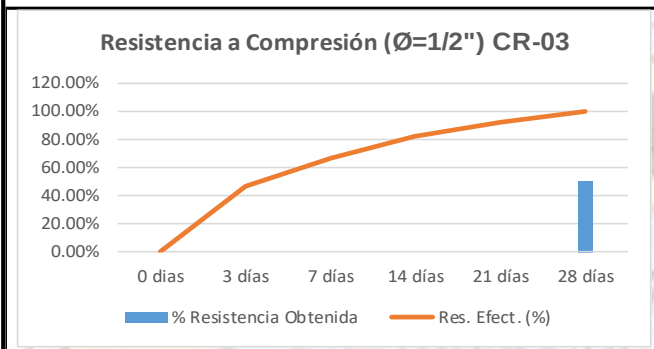


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15647.67	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	88.55	Kg/cm ²

Resistencia última (Kg/cm ²)	88.55	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm ²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	50.60	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

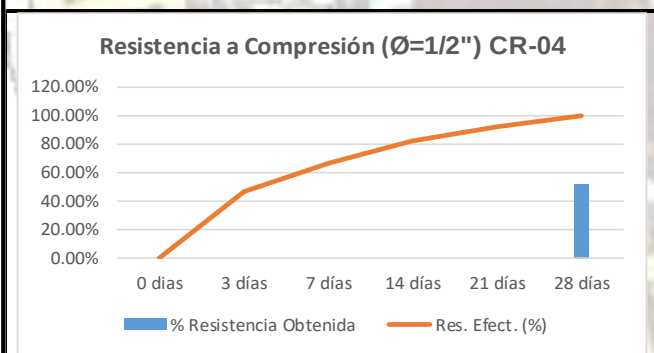


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15988.72	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	90.48	Kg/cm ²

Resistencia última (Kg/cm ²)	90.48	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm ²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	51.70	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

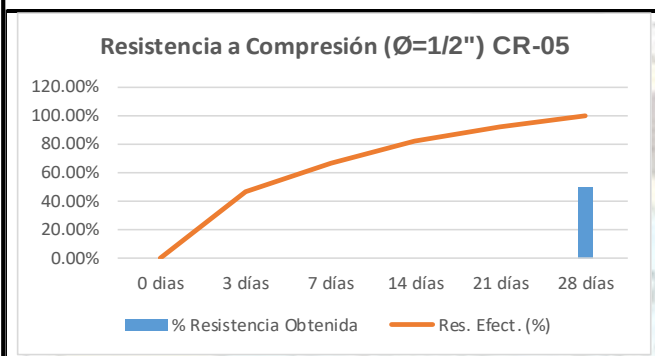


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15189.99	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	85.96	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	85.96	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	49.12	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

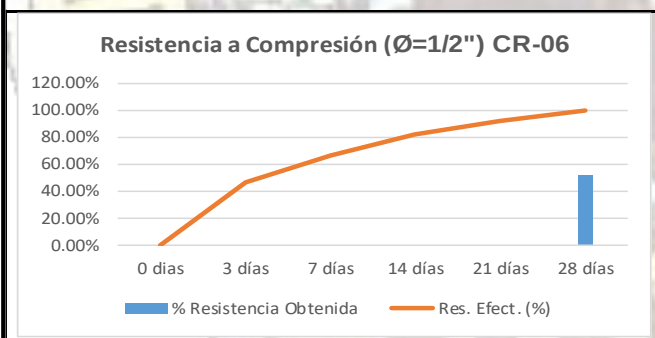


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15783.74	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	89.32	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	89.32	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	51.04	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

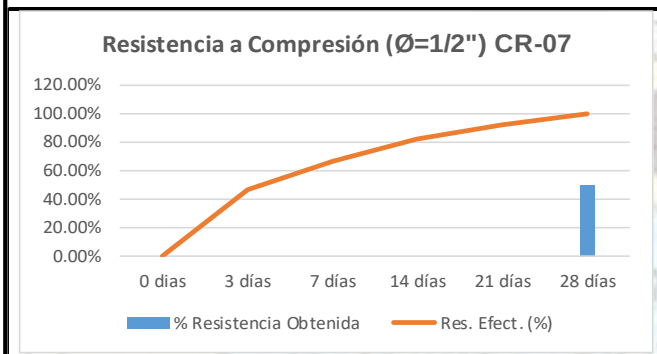


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15218.27	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	86.12	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	86.12	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	49.21	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	22/02/2018
FECHA DE ROTURA:	22/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

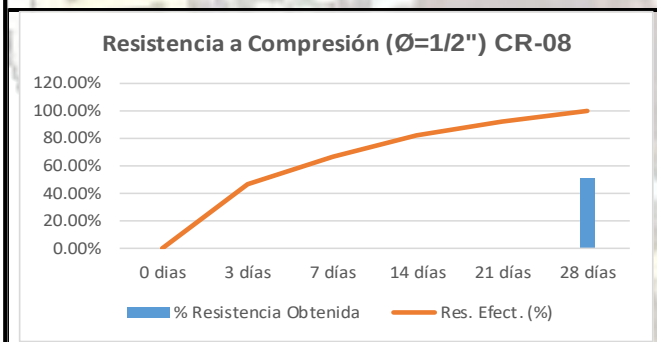


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	15681.25	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	88.74	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	88.74	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	50.71	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

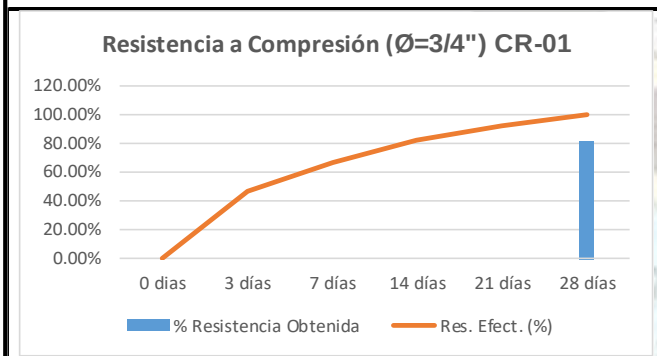


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	25184.71	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm2)	176.71	cm2
Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	142.52	Kg/cm2
Resistencia última (Kg/cm2)	142.52	Kg/cm2
Resistencia buscada (Kg/cm2)	175	Kg/cm2
% Resistencia Obtenida	81.44	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

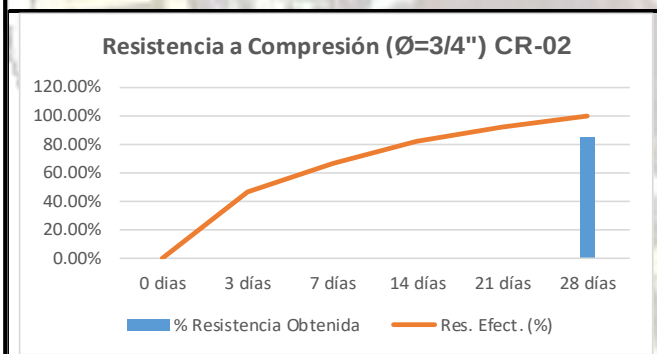


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	26285.61	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm2)	176.71	cm2
Esfuerzo a compresión (Kg/cm2)	148.75	Kg/cm2
Resistencia última (Kg/cm2)	148.75	Kg/cm2
Resistencia buscada (Kg/cm2)	175	Kg/cm2
% Resistencia Obtenida	85.00	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

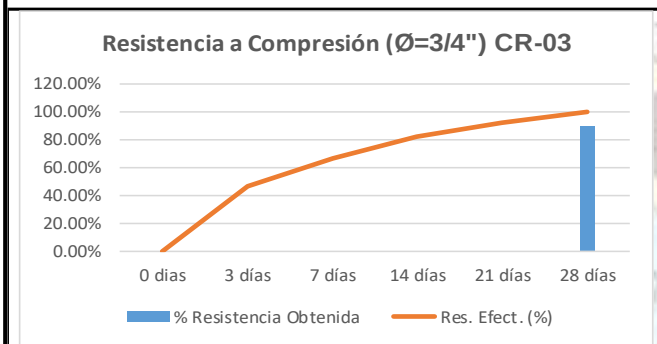


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	27490.77	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	155.57	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	155.57	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	88.90	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

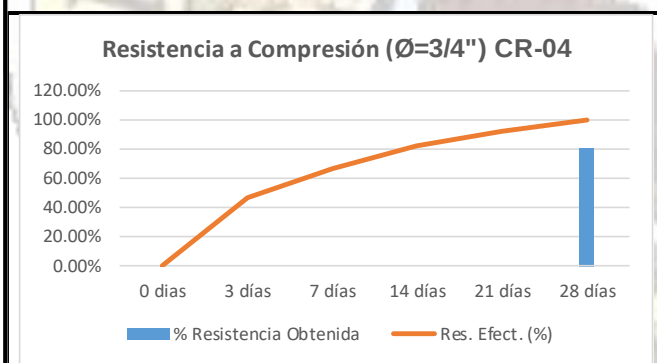


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	24771.21	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	140.18	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	140.18	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	80.10	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

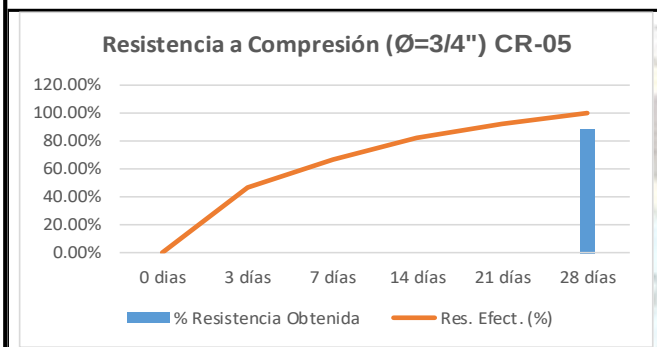


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	27209.81	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	153.98	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	153.98	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	87.99	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

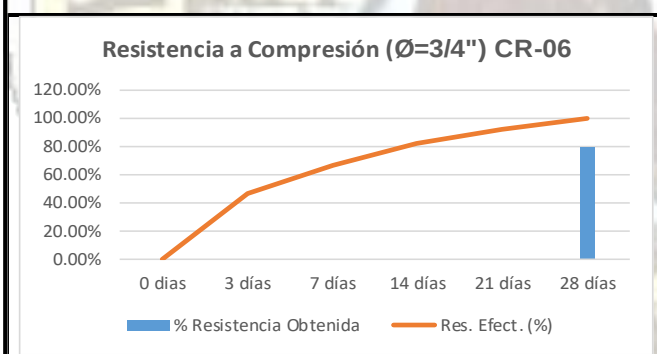


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	24465.50	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	138.45	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	138.45	Kg/cm²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm²
% Resistencia Obtenida	79.11	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

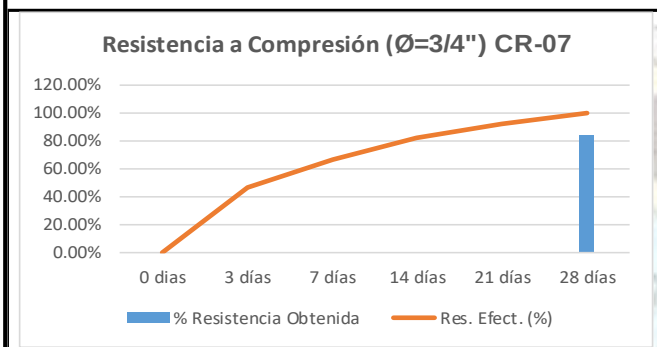


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	25776.69	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	145.87	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	145.87	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	83.35	%

**ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE EN PROBETAS
ESTANDAR DE CONCRETO (ASTM C-39)**

FECHA DE MOLDEO:	26/02/2018
FECHA DE ROTURA:	26/03/2018

EDAD	28	DÍAS
------	----	------

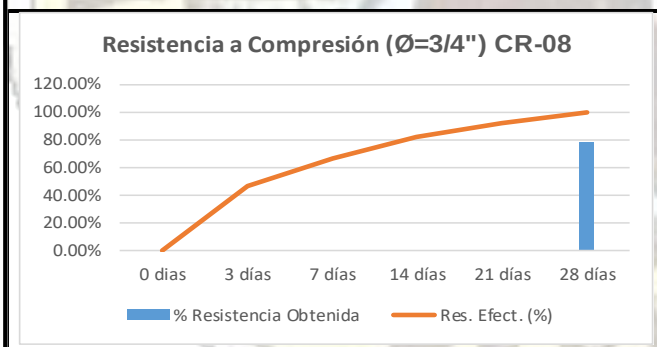


Diagrama solo de Uso Referencial para
Cemento Tipo I. Desarrollo de la
Resistencia a Compresión en % de la
Resistencia a los 28 días (teórico)

Lectura de Dial (Kg)	24089.11	Kg
Diametro de probeta (cm)	15	cm
Área (cm ²)	176.71	cm ²
Esfuerzo a compresión (Kg/cm ²)	136.32	Kg/cm ²
Resistencia última (Kg/cm²)	136.32	Kg/cm ²
Resistencia buscada (Kg/cm²)	175	Kg/cm ²
% Resistencia Obtenida	77.90	%

ANEXO IV: Constancia de uso del laboratorio de Ensayo de Materiales y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica de la Universidad Nacional de Huancavelica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL HUANCAMELICA
ÁREA DE PRODUCCIÓN DE LA EPICH



"Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional"

EL JEFE DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL HUANCAMELICA, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA, otorga la presente:

CONSTANCIA

A: **MORALES DE LA CRUZ FRANCIS WILLMOOR y PAUCAR CURASMA YESICA**,
bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil - Huancavelica, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Universidad Nacional de Huancavelica, quienes han concluido con el desarrollo los siguientes ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la EPICH:

- Ensayo de contenido de humedad de agregados (06 ensayos)
- Ensayo de peso específico y absorción de agregado grueso y fino (02 ensayos)
- Ensayo de peso unitario y % de vacíos de agregado grueso y fino (06 ensayos)
- Ensayo de análisis granulométrico de agregado fino y grueso (02 ensayos)
- Ensayo de abrasión los ángeles (01 ensayo)
- Ensayo de diseño de mezcla - elaboración y curado de probetas (03 ensayos)
- Ensayo de rotura a Compresión de Probetas Cilíndricas (21 ensayos)

Durante el periodo de ejecución Enero - Marzo del año 2018, del proyecto de tesis:
"INFLUENCIA DEL AGREGADO GRUESO DE LA CANTERA DEL RIO ICHU EN EL CONCRETO PERMEABLE PARA PAVIMENTOS DE BAJO TRÁNSITO - F'C 175KG/CM²".

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para fines que estime por conveniente.

Huancavelica, 09 de mayo de 2018.

Nº 004-2018

C. C.
Archivo
AP



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
ESCUELA ACADÉMICA DE INGENIERÍA CIVIL - HVCA
ÁREA DE PRODUCCIÓN DE LA EPICH
Ing. Judith. Martinez Quispe
JEFE

ANEXO V: Norma ACI 211. 3R-02, (1988) “GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE PROPORCIONES PARA CONCRETO DE CERO SLUMP.

Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete

Reported by ACI Committee 211

	Michael J. Boyle Chair	
Terrence E. Arnold*	Michael R. Gardner	Dipak T. Parekh
William L. Barringer	John T. Guthrie	James S. Pierce*
Muhammed P. Basheer	G. Terry Harris, Sr.	Michael F. Pistilli
Casimir Bognacki	Godfrey A. Holmstrom	Steven A. Ragan*
Gary L. Brenno	Richard D. Hill	Royce J. Rhoads
Marshall L. Brown	David L. Hollingsworth	John P. Ries
Ramon L. Carrasquillo	George W. Hollon	G. Michael Robinson
James E. Cook	Said Iravani	Donald L. Schlegel*
John F. Cook	Tarif M. Jaber	James M. Shilstone
Raymond A. Cook	Robert S. Jenkins	Ava Shypala
David A. Crocker	Frank A. Kozeliski	Jeffrey F. Speck
D. Gene Daniel	Colin L. Lobo	William X. Sypher
Francois de Larrard	Mark D. Luther	Stanley J. Virgalitte
Donald E. Dixon	Howard P. Lux	Woodward L. Vogt
Calvin L. Dold	Gart R. Mass*	Dean J. White, II
Darrell F. Elliot	Ed T. McGuire	Richard M. Wing

*Members of subcommittee who prepared revisions.

Chair of subcommittee C.

The subcommittee thanks Gary Knight and Tom Holm for providing assistance for some of the graphics in this report.

This guide is intended as a supplement to ACI 211.1. A procedure is presented for proportioning concrete that has slumps in the range of zero to 25 mm (1 in.) and consistencies below this range, for aggregates up to 75 mm (3 in.) maximum size. Suitable equipment for measuring such consistencies is described. Tables and charts similar to those in ACI 211.1 are provided which, along with laboratory tests on physical properties of fine and coarse aggregate, yield information for obtaining concrete proportions for a trial mixture.

This document also includes appendices on proportioning mixtures for roller-compacted concrete, concrete roof tile, concrete masonry units, and

pervious concrete for drainage purposes. Examples are provided as an aid in calculating proportions for these specialty applications.

Keywords: durability; mixture proportioning; no-s slump concrete; roller-compacted concrete; slump test; water-cementitious materials ratio.

CONTENTS

Chapter 1—Scope and limits, p. 211.3R-2

Chapter 2—Preliminary considerations, p. 211.3R-2

- 2.1—General
- 2.2—Methods for measuring consistency
- 2.3—Mixing water requirement

Chapter 3—Selecting proportions, p. 211.3R-3

- 3.1—General
- 3.2—Slump and maximum-size aggregate
- 3.3—Estimating water and aggregate grading requirements
- 3.4—Selecting water-cementitious materials ratio
- 3.5—Estimate of coarse aggregate quantity

ACI Committee Reports, Guides, Standard Practices, and Commentaries are intended for guidance in planning, designing, executing, and inspecting construction. This document is intended for the use of individuals who are competent to evaluate the significance and limitations of its content and recommendations and who will accept responsibility for the application of the material it contains. The American Concrete Institute disclaims any and all responsibility for the stated principles. The Institute shall not be liable for any loss or damage arising therefrom.

Reference to this document shall not be made in contract documents. If items found in this document are desired by the Architect/Engineer to be a part of the contract documents, they shall be restated in mandatory language for incorporation by the Architect/Engineer.

ACI 211.3R-02 supersedes ACI 211.3R-97 and became effective January 11, 2002.
Copyright © 2002, American Concrete Institute.
All rights reserved including rights of reproduction and use in any form or by any means, including the making of copies by any photo process, or by electronic or mechanical device, printed, written, or oral, or recording for sound or visual reproduction or for use in any knowledge or retrieval system or device, unless permission in writing is obtained from the copyright proprietors.

Chapter 4—Proportioning computations (SI units), p. 211.3R-7

- 4.1—General proportioning criteria
- 4.2—Example of proportioning computations
- 4.3—Batching quantities for production-size batching
- 4.4—Adjustment of trial mixture

Chapter 5—References, p. 211.3R-9

- 5.1—Referenced standards and reports
- 5.2—Cited references

Appendix 1—Proportioning computations (inch-pound units), p. 211.3R-10

Appendix 2—Laboratory tests, p. 211.3R-11

Appendix 3—Roller-compacted concrete mixture proportioning, p. 211.3R-13

Appendix 4—Concrete roof tile mixture proportioning, p. 211.3R-20

Appendix 5—Concrete masonry unit mixture proportioning, p. 211.3R-21

Appendix 6—Pervious concrete mixture proportioning, p. 211.3R-24

CHAPTER 1—SCOPE AND LIMITS

ACI 211.1 provides methods for proportioning concrete with slumps greater than 25 mm (1 in.) as measured by ASTM C 143/C 143M. This guide is an extension of ACI 211.1 and addresses the proportioning of concrete having slump in the range of zero to 25 mm (1 in.).

The paired values stated in inch-pound and SI units are the results of conversions that reflect the intended degree of accuracy. Each system is used independently of the other in the examples. Combining values from the two systems may result in nonconformance with this guide.

In addition to the general discussion on proportioning no-slump concrete, this guide includes proportioning procedures for these classes of no-slump concrete: roller-compacted concrete (Appendix 3); roof tiles (Appendix 4); concrete masonry units (CMU) (Appendix 5); and pervious concrete (Appendix 6).

CHAPTER 2—PRELIMINARY CONSIDERATIONS

2.1—General

The general comments contained in ACI 211.1 are pertinent to the procedures discussed in this guide. The description of the constituent materials of concrete, the differences in proportioning the ingredients, and the need for knowledge of the physical properties of the aggregate and cementitious materials apply equally to this guide. The level of overdesign indicated in ACI 301 and ACI 318/318R should be applied to the compressive strength used for proportioning.

2.2—Methods for measuring consistency

Workability is the property of concrete that determines the ease with which it can be mixed, placed, consolidated, and finished. No single test is available that will measure this

Table 2.1—Comparison of consistency measurements for slump and Vebe apparatus

Consistency description	Slump, mm	Slump, in.	Vebe, s
Extremely dry	—	—	32 to 18
Very stiff	—	—	18 to 10
Stiff	0 to 25	0 to 1	10 to 5
Stiff plastic	25 to 75	1 to 3	5 to 3
Plastic	75 to 125	3 to 5	3 to 0
Very plastic	125 to 190	5 to 7-1/2	—

property in quantitative terms. It is usually expedient to use some type of consistency measurement as an index to workability. Consistency may be defined as the relative ability of freshly mixed concrete to flow. The slump test is the most familiar test method for consistency and is the basis for the measurement of consistency under ACI 211.1.

No-slump concrete will have poor workability if consolidated by hand-rodging. If vibration is used, however, such concrete might be considered to have adequate workability. The range of workable mixtures can therefore be widened by consolidation techniques that impart greater energy into the mass to be consolidated. The Vebe apparatus,^{1,2} the compacting factor apparatus,³ the modified compaction test, and the Thaulow drop table⁴ are laboratory devices that can provide a useful measure of consistency for concrete mixtures with less than 25 mm (1 in.) slump. Of the three consistency measurements, the Vebe apparatus is frequently used today in roller-compacted concrete and will be referred to in this guide. The Vebe test is described in Appendix 2. If none of these methods are available, consolidation of the trial mixture under actual placing conditions in the field or laboratory will, of necessity, serve as a means for determining whether the consistency and workability are adequate. Suitable workability is often based on visual judgement for machine-made precast concrete products.

A comparison of Vebe test results with the conventional slump test is shown in Table 2.1. Note that the Vebe test can provide a measure of consistency in mixtures termed "extremely dry." Vebe time at compaction is influenced by other factors such as moisture condition of aggregates, time interval after mixing, and climatic conditions.

2.3—Mixing water requirement

In ACI 211.1, approximate relative mixing water requirements are given for concrete conforming to the consistency descriptions of stiff plastic, plastic, and very plastic, as shown in Table 2.2 of this guide. Considering the water requirement for the 75 to 100 mm (3 to 4 in.) slump as 100%, the relative water contents for those three consistencies are 92, 100, and 106%, respectively. Thaulow⁵ extended this concept of relative water contents to include stiffer mixtures, as shown in Table 2.2.

Figure 2.1 and 2.2 have been prepared based on the results from a series of laboratory tests in which the average air contents were as indicated in Figure 2.3. These tests show that the factors in Table 2.2 need to be applied to the quantities given in ACI 211.1 to obtain the approximate water content for

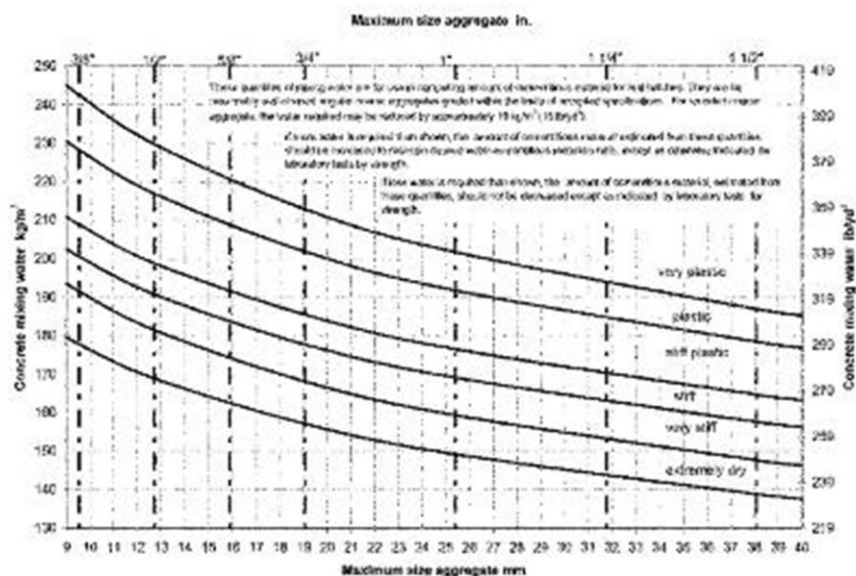


Fig. 2.1—Approximate mixing water requirements for different consistencies and maximum-size aggregate for nonair-entrained concrete.



Fig. 2.2—Approximate mixing water requirements for different consistencies and maximum-size aggregate for air-entrained concrete.

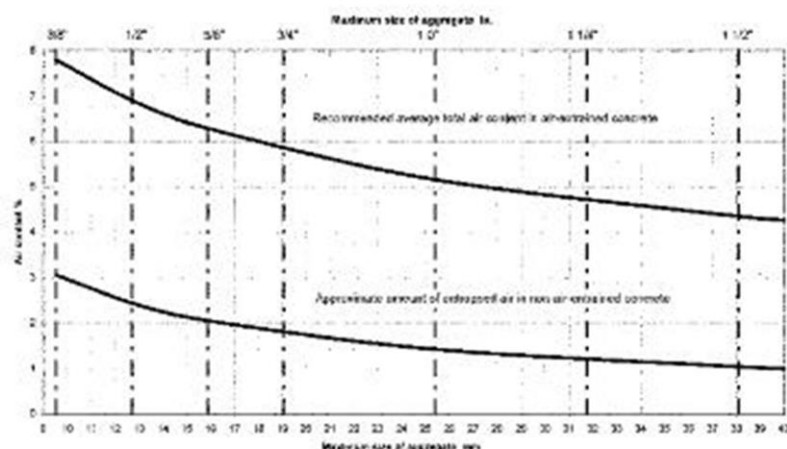
the six consistency designations. Approximate relative mixing water requirements are given in kg/m^3 (lb/yd^3) using the relative water contents shown by Thaulow⁵ for the stiff, very stiff, and extremely dry consistencies. For a given combination of materials, a number of factors will affect the actual mixing water requirement and can result in a considerable difference from the values shown in Fig. 2.1 and 2.2. These factors include particle shape and grading of the aggregate, air content and temperature of the concrete, the

effectiveness of mixing, chemical admixtures, and the method of consolidation. With respect to mixing, for example, spiral-blade and pan-type mixers are more effective for no-slump concretes than are rotating-drum mixers.

CHAPTER 3—SELECTING PROPORTIONS

3.1—General

Cementitious materials include the combined mass of cement, natural pozzolans, fly ash, ground granulated-



For consistencies below 25 mm (1 in.) slump, the values of air entrapped as well as air-entraining content or the values of air content of entrapped air in non-air-entrained concrete may be significantly lower than those shown.

Fig. 2.3—Air content of concrete mixtures for different maximum size aggregate.

Table 2.2—Approximate relative water content for different consistencies

Consistency description	Approximate relative water content, %	
	Thaulow ⁵	Table 6.3.3, ACI 211.1
Extremely dry	78	—
Very stiff	83	—
Stiff	88	—
Stiff plastic	93	92
Plastic	100	100
Very plastic	106	106

blast-furnace slag (GGBFS), and silica fume that are used in the mixture.

As recommended in ACI 211.1, concrete should be placed using the minimum quantity of mixing water consistent with mixing, placing, consolidating, and finishing requirements because this will have a favorable influence on strength, durability, and other physical properties. The major considerations in selecting proportions apply equally well to no-slump concretes as to the more plastic mixtures. These considerations are:

- Adequate durability in accordance with ACI 201.2R to satisfactorily withstand the weather and other destructive agents to which it may be exposed;
- Strength required to withstand the design loads with the required margin of safety;
- The largest maximum-size aggregate consistent with economic availability, satisfactory placement, and concrete strength;
- The stiffest consistency that can be efficiently consolidated; and
- Member geometry.

3.2—Slump and maximum-size aggregate

ACI 211.1 contains recommendations for consistencies in the range of stiff plastic to very plastic. These, as well as

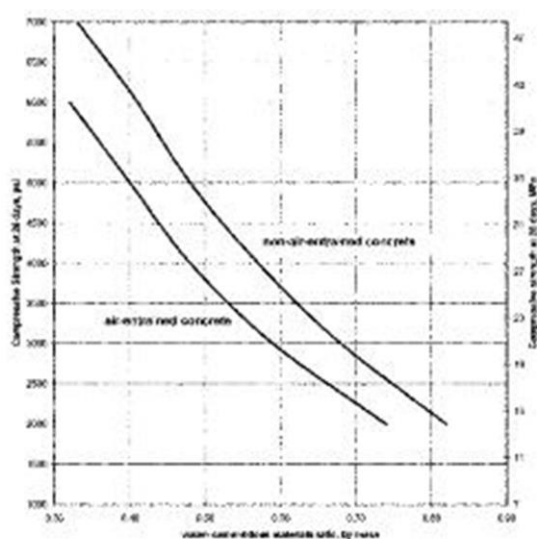
stiffer consistencies, are included in Fig. 2.1 and 2.2. Consistencies in the very-stiff range and drier are often used in the fabrication of various precast elements such as, pipe, prestressed members, CMU, and roof tiles. Also, roller-compacted and pervious concretes fall into the no-slump categories as discussed in Appendix 3 through 6. There is no apparent justification for setting limits for maximum and minimum consistency in the manufacture of these materials because the optimum consistency is highly dependent on the equipment, production methods, and materials used. It is further recommended that, wherever possible, the consistencies used should be in the range of very stiff or drier, because the use of these drier consistencies that are adequately consolidated will result in improved quality and a more economical product.

The nominal maximum size of the aggregate to be selected for a particular type of construction is dictated primarily by consideration of both the minimum dimension of a section and the minimum clear spacing between reinforcing bars, prestressing tendons, ducts for post-tensioning tendons, or other embedded items. The largest permissible maximum-size aggregate should be used; however, this does not preclude the use of smaller sizes if they are available and their use would result in equal or greater strength with no detriment to other concrete properties.

For reinforced, precast concrete products such as pipe, the maximum coarse aggregate size is generally 19 mm (3/4 in.) or less.

3.3—Estimating water and aggregate-grading requirements

The quantity of water per unit volume of concrete required to produce a mixture of the desired consistency is influenced by the maximum size, particle shape, grading of the aggregate, and the amount of entrained air. It is relatively unaffected by the quantity of cementitious material below about 360 to



Values are estimated average strengths for concrete containing not more than the percentage of air shown in Fig. 2.2. For a constant water-cementitious materials ratio, the strength of concrete is selected on the air content to be used. Strength is based on 150 x 300 mm (6 x 12 in.) cylinders prepared in accordance with ASTM C 318 and tested at 28 days at 23 ± 1.7 °C (73.4 ± 3.1 °F). Relationship shown is maximum size of aggregate about 19 to 25 mm (3/4 to 1 in.) for a given source; strength produced for a given water-cementitious materials ratio will increase as maximum size of aggregate increases.

Fig. 3.1—Relationships between water-cementitious materials ratio and compressive strength of concrete.

3.9 kg/m³ (610 to 660 lb/yd³). In mixtures richer than these, mixing water requirements can increase significantly as cementitious materials contents are increased. Acceptable aggregate gradings are presented in ASTM C 33 and AASHTO M 6 and M 80.

Aggregate grading is an important parameter in selecting proportions for concrete in machine-made precast products such as pipes, CMU, roof tile, manholes, and prestressed products. Forms for these products are removed immediately after the concrete is placed and consolidated, or the concrete is placed by an extrusion process. In either case, the concrete has no external support immediately after placement and consolidation; therefore, the fresh concrete mixture should be cohesive enough to retain its shape after consolidation. Cohesiveness is achieved by providing sufficient fines in the mixtures. Some of these fines can be obtained by careful selection of the fine aggregate gradings. Pozzolans, such as fly ash, have also been used to increase cohesiveness. In some cases, the desired cohesiveness can be improved by increasing the cementitious materials content. This approach is not recommended, however, because of negative effects of excessive cementitious materials such as greater heat of hydration and drying shrinkage.

The quantities of water shown in Fig. 2.1 and 2.2 of this guide are sufficiently accurate for preliminary estimates of proportions. Actual water requirements need to be established in laboratory trials and verified by field tests. This should result in water-cementitious materials ratios (w/cm)

in the range of 0.25 to 0.40 or higher. Examples of such adjustments are given further in this guide.

For machine-made, precast concrete products such as pipes and CMU, the general rule is to use as much water as the product will tolerate without slumping or cracking when the forms are stripped.

3.4—Selecting water-cementitious materials ratio

The selection of w/cm depends on the required strength. Figure 3.1 provides initial information for w/cm . The compressive strengths are for 150 x 300 mm (6 x 12 in.) cylinders, prepared in accordance with ASTM C 192, subjected to standard moist curing, and tested at 28 days in accordance with ASTM C 39 for the various ratios. The required w/cm to achieve a desired strength depends on whether the concrete is air-entrained.

Using the maximum permissible w/cm from Fig. 3.1 and the approximate mixing water requirement from Fig. 2.1 and 2.2, the cementitious material content can be calculated by dividing the mass of water needed for mixing by the w/cm . If the specifications for the job contain a minimum cementitious material content requirement, the corresponding w/cm for estimating strength can be computed by dividing the mass of water by the mass of the cementitious material. The lowest of the three w/cm s—those for durability, strength, or cementitious material content—should be selected for calculating concrete proportions.

Air-entraining admixtures or air-entraining cements can be beneficial in ensuring durable concrete in addition to providing other advantages, such as reduction in the mixture harshness with no increase in water. Air-entrained concrete should be used when the concrete products are expected to be exposed to frequent cycles of freezing and thawing in a moist, critically saturated condition. ASTM C 666 testing before construction is recommended to assess resistance to freezing-and-thawing characteristics of the no-slump concrete. If these no-slump concrete mixtures may be exposed to deicer salts, they should also be tested in accordance with ASTM C 666.

Figure 3.1 is based on the air contents shown in Fig. 2.3. In Fig. 3.1 at equal w/cm , the strengths for the air-entrained concrete are approximately 20% lower than for the non-air-entrained concrete. These differences may not be as great in the no-slump mixtures because the volume of entrained air in these mixtures using an air-entraining cement, or the usual amount of air-entraining admixture per unit of cementitious material, will be reduced significantly with practically no loss in resistance to freezing and thawing and density. In addition, when cementitious material content and consistency are constant, the differences in strength are partially or entirely offset by reduction of mixing water requirements that result from air entrainment.

The required average strength necessary to ensure the strength specified for a particular job depends on the degree of control over all operations involved in the production and testing of the concrete. See ACI 214 for a complete guide. If flexural strength is a requirement rather than compressive strength, the relationship between w/cm and flexural

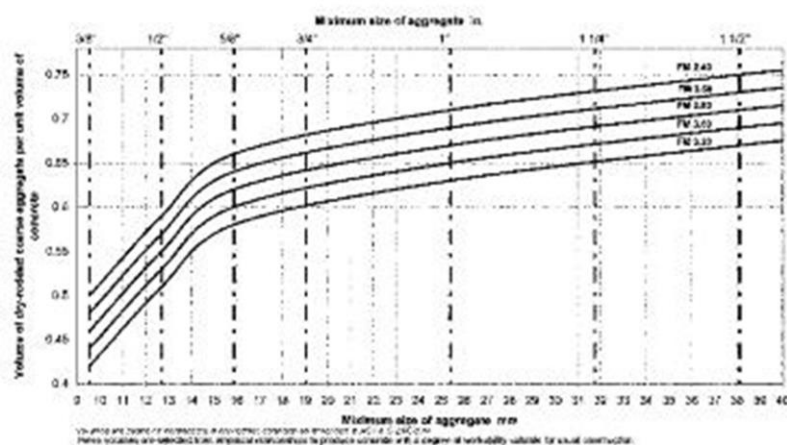


Fig. 3.2—Volume of coarse aggregate per unit volume of concrete of plastic consistency (75 to 125 mm [3 to 5 in.] slump).

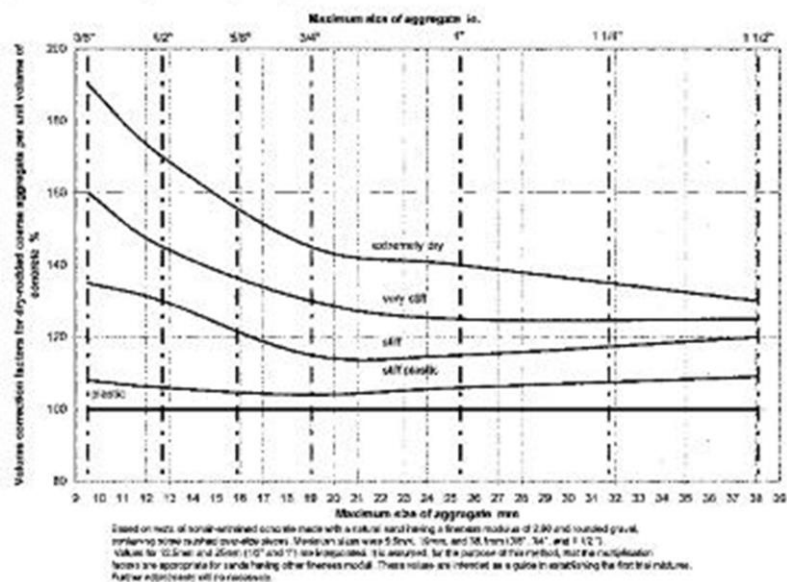


Fig. 3.3—Volume correction factors for dry-rodded coarse aggregate for concrete of different consistencies.

strength should be determined by laboratory tests using the job materials.

3.5—Estimate of coarse aggregate quantity

The largest quantity of coarse aggregate per unit volume of concrete should be used and be consistent with adequate placeability. For the purpose of this document, placeability is defined as the ability to adequately consolidate the mixture with the minimum of physical and mechanical time and effort. For a given aggregate, the amount of mixing water required will then be at a minimum and strength at a maximum. This quantity of coarse aggregate can best be determined from laboratory investigations using the materials for the

intended work with later adjustment in the field or plant. If such data are not available or cannot be obtained, Fig. 3.2 provides a good estimate of the amount of coarse aggregate for various concrete having a degree of workability suitable for usual reinforced concrete construction (approximately 75 to 100 mm [3 to 4 in.] slump). These values of dry-rodded volume of coarse aggregate per unit volume of concrete are based on established empirical relationships for aggregates graded within conventional limits. Changes in the consistency of the concrete can be affected by changing the amount of coarse aggregate per unit volume of concrete. As greater amounts of coarse aggregate per unit volume are used, the consistency will decrease. For the very plastic and

plastic consistencies, the volume of coarse aggregate per unit volume of concrete is essentially unchanged from that shown in Fig. 3.2. For the stiffer consistencies—those requiring vibration—the amount of coarse aggregate that can be accommodated increases rather sharply in relation to the amount of fine aggregate required. Figure 3.3 shows some typical values of the volume of coarse aggregate per unit volume of concrete for different consistencies, expressed as a percentage of the values shown in Fig. 3.2. The information contained in these two figures provides a basis for selecting an appropriate amount of coarse aggregate for the first trial mixture. Adjustments in this amount will probably be necessary in the field or plant operation.

In precast concrete products where cohesiveness is required to retain the concrete shape after the forms are stripped, the volume of coarse aggregate can be reduced somewhat from the values indicated in Fig. 3.2. The degree of cohesiveness required depends on the particular process used to make the concrete product. Uniformly graded aggregate is important in precast concrete pipe; therefore, blends of two or more coarse aggregates are frequently used.

Concrete of comparable workability can be expected with aggregates of comparable size, shape, and grading when a given dry-rodded volume of coarse aggregate per unit volume of concrete is used. In the case of different types of aggregates, particularly those with different particle shapes, the use of a fixed dry-rodded volume of coarse aggregate automatically makes allowance for differences in mortar requirements as reflected by void content of the coarse aggregate. For example, angular aggregates have a higher void content, and therefore, require more mortar than rounded aggregates.

This aggregate-estimating procedure does not reflect variations in grading of coarse aggregates within different maximum-size limits, except as they are reflected in percentages of voids. For coarse aggregates falling within the limits of conventional grading specifications, this omission probably has little importance. The optimum dry-rodded volume of coarse aggregate per unit volume of concrete depends on its maximum size and the fineness modulus of the fine aggregate as indicated in Fig. 3.2.

CHAPTER 4—PROPORTIONING COMPUTATIONS (SI UNITS)

4.1—General proportioning criteria

Computation of proportions will be explained by one example. The following criteria are assumed:

- The cement specific gravity is 3.15;
- Coarse and fine aggregates in each case are of satisfactory quality and are graded within limits of generally accepted specifications such as ASTM C 33 and C 331;
- The coarse aggregate has a specific gravity, bulk oven dry, of 2.68, and an absorption of 0.5%; and
- The fine aggregate has a specific gravity, bulk oven dry, of 2.64, an absorption of 0.7%, and fineness modulus of 2.80.

4.2—Example of proportioning computations

Concrete is required for an extruded product in northern France that will be exposed to severe weather with frequent

cycles of freezing and thawing. Structural considerations require it to have a design compressive strength of 30 MPa at 28 days. From previous experience in the plant producing similar products, the expected coefficient of variation of strengths is 10%. It is further required that no more than one test in 10 will fall below the design strength of 30 MPa at 28 days. From Fig. 4.1(a) of ACI 214, the required average strength at 28 days should be $30 \text{ MPa} \times 1.15$, or 35 MPa. The size of the section and spacing of reinforcement are such that a nominal maximum-size coarse aggregate of 40 mm, graded to 4.75 mm, can be used and is locally available. Heavy internal and external vibration are available to achieve consolidation, enabling the use of very stiff concrete. The dry-rodded density of the coarse aggregate is 1600 kg/m^3 . Because the exposure is severe, air-entrained concrete will be used. The proportions may be computed as follows:

From Fig. 3.1, the w/cm required to produce an average 28-day strength of 35 MPa in air-entrained concrete is shown to be approximately 0.40 by mass.

The approximate quantity of mixing water needed to produce a consistency in the very stiff range in air-entrained concrete made with 40 mm nominal maximum-size aggregate is 130 kg/m^3 (Fig. 2.2). In Fig. 2.3, the required air content for the more plastic mixture is indicated to be 4.5%, which will be produced by using an air-entraining admixture. An air-entraining admixture, when added at the mixer as liquid, should be included as part of the mixing water. The note to the figure calls attention to the lower air contents entrained in stiffer mixtures. For this concrete, assume the air content to be 3.0% when the suggestions in the note are followed.

From the preceding two paragraphs, it can be seen that the required cementitious material is $130/0.40 = 325 \text{ kg/m}^3$. Only portland cement will be used.

Figure 3.2, with a nominal maximum-size aggregate of 40 mm and a fineness modulus of sand of 2.80, 0.71 m^3 of coarse aggregate on a dry-rodded basis, would be required in each cubic meter of concrete having a slump of about 75 to 100 mm.

In Fig. 3.3, for the very stiff consistency desired, the amount of coarse aggregate should be 125% of that for the plastic consistency, or $0.71 \times 1.25 = 0.89 \text{ m}^3$. The quantity in a cubic meter will be 0.89 m^3 , which in this case is $0.89 \text{ m}^3 \times 1600 \text{ kg/m}^3 = 1424 \text{ kg}$.

With the quantities of cement, water, coarse aggregate, and air established, the sand content is calculated as follows:

$$\text{Solid volume of cement} = \frac{325}{3.15 \times 1000} = 0.103 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume of water} = \frac{130}{1000} = 0.130 \text{ m}^3$$

$$\text{Solid volume of coarse aggregate} = \frac{1424}{2.68 \times 1000} = 0.531 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume of air} = 1 \times 0.030 = 0.030 \text{ m}^3$$

Table 4.1—Comparison between computed batch quantities and those used in production

Ingredients	Batch quantities of concrete per cubic meter	
	Computed, kg	Used in production, kg
Cement	325	325
Net mixing water	130	130
Sand	544 (oven dry)	571 (moist)
Coarse aggregate	1424 (oven dry)	1438 (moist)
Water absorbed	11	—
Excess water	—	~30
Total	2434	2434
Water added at mixer	141	100

Total volume of ingredients except sand = 0.794 m^3

Solid volume of sand required = $1 - 0.794 = 0.206 \text{ m}^3$

Required mass of oven-dry sand = $0.206 \times 2.64 \times 1000 = 544 \text{ kg}$

Water absorbed by oven-dry aggregates = $(544 \times 0.007) + (1424 \times 0.005) = 11 \text{ kg}$

The estimated batch quantities per cubic meter of concrete are:

Cement = 325 kg
 Water = 141 kg (130 + 11)
 Sand, oven-dry = 544 kg
 Coarse aggregate, oven-dry = 1424 kg
 Air-entraining admixture = (as required) for 3% air

4.3—Batching quantities for production-size batching

For the sake of convenience in making trial mixture computations, the aggregates have been assumed to be in an oven-dry state. Under production conditions, they generally will be moist and the quantities to be batched into the mixer should be adjusted accordingly.

With the batch quantities determined in the example, assume that tests show the sand to contain 5.0% and the coarse aggregate 1.0% total moisture. Because the quantity of oven-dry sand required was 544 kg, the amount of moist sand to be weighed out should be $544 \text{ kg} \times 1.05 = 571 \text{ kg}$. Similarly, the amount of moist, coarse aggregate should be $1424 \times 1.01 = 1438 \text{ kg}$.

The free water in the aggregates, in excess of their absorption, should be considered as part of the mixing water. Because the absorption of sand is 0.7%, the amount of free water which it contains is $5.0 - 0.7 = 4.3\%$. The free water in the coarse aggregate is $1.0 - 0.5 = 0.5\%$. Therefore, the mixing water contributed by the sand is $0.043 \times 544 = 23 \text{ kg}$ and that contributed by the coarse aggregate is $0.005 \times 1424 = 7 \text{ kg}$. The quantity of mixing water to be added is $130 - (23 + 7) = 100 \text{ kg}$. Table 4.1 shows a comparison between the computed batch quantities and those to be used in the field for each cubic

meter of concrete. The actual quantities used during production will vary because it depends on the moisture contents of the stockpiled aggregates which will vary.

The preceding trial mixture computations provide batch quantities for each ingredient of the mixture per cubic meter of concrete. It is seldom desirable or possible to mix concrete in exactly 1 m^3 batches. It is therefore necessary to convert these quantities in proportion to the batch size to be used. Let it be assumed that a 0.55 m^3 capacity mixer is available. Then to produce a batch of the desired size and maintain the same proportions, the cubic meter batch quantities of all ingredients should be reduced quantities to the following quantities:

Cement = $0.55 \times 325 = 179 \text{ kg}$
 Sand (moist) = $0.55 \times 571 = 314 \text{ kg}$
 Coarse aggregate (moist) = $0.55 \times 1438 = 791 \text{ kg}$
 Water to be added = $0.55 \times 100 = 55 \text{ kg}$

4.4—Adjustment of trial mixture

The estimate of total water requirement given in Fig. 2.1 and 2.2 may understate the water required. In such cases, the amount of cementitious materials should be increased to maintain the w/cm , unless otherwise indicated by laboratory tests. This adjustment will be illustrated by assuming that the concrete for the example was found in the trial batch to require 135 kg of mixing water instead of 130 kg. Consequently, the cementitious materials content should be increased from 325 to $(135/130) \times 325 = 338 \text{ kg/m}^3$ and the batch quantities recomputed accordingly.

Sometimes less water than indicated in Fig. 2.1 and 2.2 may be required, but it is recommended that no adjustment be made in the amount of cementitious materials for the batch in progress. Strength results may warrant additional batches with less cementitious materials. Adjustment in batch quantities is necessary to compensate for the loss of volume due to the reduced water. This is done by increasing the solid volume of sand in an amount equal to the volume of the reduction in water. For example, assume that 125 kg of water is required instead of 130 kg for the concrete of the example. Then $125/1000$ is substituted for $130/1000$ in computing the volume of water in the batch. This results in 0.005 m^3 less water; therefore, the solid volume of sand becomes $0.206 + 0.005 = 0.211 \text{ m}^3$.

The percentage of air in some no-slump concrete that can be consolidated in the container by vibration can be measured directly with an air meter (ASTM C 231) or it can be computed gravimetrically from measurement of the fresh concrete density in accordance with ASTM C 138. For any given set of conditions and materials, the amount of air entrained is approximately proportional to the quantity of air-entraining admixture used. Increasing the cementitious materials content or the fine fraction of the sand, decreasing slump, or raising the temperature of the concrete usually decreases the amount of air entrained for a given amount of admixture. The grading and particle shape of aggregate also have an effect on the amount of entrained air. The job mixture should not be adjusted for minor fluctuations in w/cm or air content. A variation in w/cm of ± 0.02 , 0.38 to 0.42 in the above example,

resulting from maintaining a constant consistency, is considered normal for no-slump concrete where compactability and densification respond better to target values for w/cm . A variation of $\pm 1\%$ in air content is also considered normal. This variation in air content will be smaller in the drier mixtures.

CHAPTER 5—REFERENCES

5.1—Referenced standards and reports

The standards of the various standards producing organizations applicable to this document are listed below with their serial designations. Since some of these standards are revised frequently, generally in minor details only, the user of this document should contact the sponsoring group, if it is desired to refer to the latest document.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

- M 6 Fine Aggregate for Portland Cement Concrete
- M 80 Coarse Aggregate for Portland Cement Concrete

American Concrete Institute (ACI)

- 116R Cement and Concrete Terminology
- 201.2R Guide to Durable Concrete
- 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete
- 207.1R Mass Concrete
- 207.5R Roller-Compacted Mass Concrete
- 214 Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete
- 301 Specifications for Structural Concrete for Buildings
- 318/318R Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary
- 325.10R State-of-the-Art Report on Roller-Compacted Concrete Pavements

American Society for Testing and Materials Standards (ASTM)

- C 29/ Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate
- C 29 M
- C 31/ Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
- C 31 M
- C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates
- C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- C 78 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)
- C 90 Standard Specification for Load Bearing Concrete Masonry Units
- C 136 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate
- C 138 Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete
- C 143/ Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete
- C 143 M
- C 150 Standard Specification for Portland Cement
- C 192/ Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- C 192 M

- C 231 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method
- C 331 Standard Specification for Lightweight Aggregate for Concrete Masonry Units
- C 566 Standard Test Method for Total Moisture Content of Aggregate by Drying
- C 618 Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete
- C 666 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- C 1170 Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table
- C 1176 Practice for Making Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Table
- D 1557 Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort
- SI 10 Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System

The above publications may be obtained from the following organizations:

American Association of State Highway and Transportation Officials
444 N. Capitol St. NW Suite 225
Washington, DC 20001

American Concrete Institute
P.O. Box 9094
Farmington Hills, MI 48333-9094

ASTM
100 Barr Harbor Drive
West Conshohocken, PA 19428-2959

5.2—Cited references

1. Bahner, V., 1940, "New Swedish Consistency Test Apparatus and Method," *Betong* (Stockholm), No. 1, pp. 27-38.
2. Cusens, A. R., 1956, "The Measurement of the Workability of Dry Concrete Mixes," *Magazine of Concrete Research*, V. 8, No. 22, Mar., pp. 23-30.
3. Glanville, W. H.; Collins, A. R.; and Matthews, D. D., 1947, "The Grading of Aggregates and Workability of Concrete," *Road Research Technical Paper No. 5*, Department of Scientific and Industrial Research/Ministry of Transport, Her Majesty's Stationery Office, London, 38 pp.
4. Thaulow, S., 1952, *Field Testing of Concrete*, Norsk Cementforening, Oslo.
5. Thaulow, S., 1955, *Concrete Proportioning*, Norsk Cementforening, Oslo.
6. Meininger R.C., 1988, "No-Fines Pervious Concrete for Paving," *Concrete International*, V. 10, No. 8, Aug., pp. 20-27.
7. NCMA High Strength Block Task Force, 1971, *Special Considerations for Manufacturing High Strength Concrete Masonry Units*.

8. Menzel, C. A., 1934, "Tests of the Fire Resistance and Strength of Walls of Concrete Masonry Units," PCA, Jan.

9. Grant, W., 1952, *Manufacture of Concrete Masonry Units*, Concrete Publishing Corp., Chicago, IL.

APPENDIX 1—PROPORTIONING COMPUTATIONS (INCH-POUND UNITS)

A1.1—General proportioning criteria

Computation of proportions will be explained by one example. The following criteria are assumed:

- The cement specific gravity is 3.15;
- Coarse and fine aggregates in each case are of satisfactory quality and are graded within limits of generally accepted specifications;
- The coarse aggregate has a specific gravity, bulk oven-dry, of 2.68 and an absorption of 0.5%; and
- The fine aggregate has a specific gravity, bulk oven-dry, of 2.64, an absorption of 0.7%, and fineness modulus of 2.80.

A1.2—Example of proportioning computations

Concrete is required for an extruded product that will be exposed to severe weather with frequent cycles of freezing and thawing. Structural considerations require it to have a design compressive strength of 4000 psi at 28 days. From previous experience in the plant producing similar products, the expected coefficient of variation of strengths is 10%. It is further required that no more than one test in 10 will fall below the design strength of 4000 psi at 28 days. From Fig. 4.1(a) of ACI 214, the required average strength at 28 days should be 4000×1.15 , or 4600 psi. The size of the section and spacing of reinforcement are such that a nominal maximum-size coarse aggregate of 1-1/2 in. graded to No. 4 can be used and is locally available. Heavy internal and external vibrations are available to achieve consolidation, enabling the use of very stiff concrete. The dry-rodded density of the coarse aggregate is found to be 100 lb/ft³. Because the exposure is severe, air-entrained concrete will be used. The proportions may be computed as follows:

From Fig. 3.1, the *w/cm* required to produce an average 28 day strength of 4600 psi in air-entrained concrete is shown to be approximately 0.43 by mass.

The approximate quantity of mixing water needed to produce a consistency in the very stiff range in air-entrained concrete made with 1-1/2 in. nominal maximum-size aggregate is to be 225 lb/yd³ (Fig. 2.2). In Fig. 2.3, the desired air content, which in this case will be produced by use of an air-entraining admixture, is indicated as 4.5% for the more plastic mixtures. An air-entraining admixture, when added at the mixer as liquid, should be included as part of the mixing water. The note to the figure calls attention to the lower air contents entrained in these stiffer mixtures. For this concrete, assume the air content to be 3.0% when the suggestions in the note are followed.

From the preceding two paragraphs, it can be seen that the required cementitious material is $225/0.43 = 523$ lb/yd³. Portland cement only will be used.

From Fig. 3.2, with a nominal maximum-size aggregate of 1-1/2 in. and a fineness modulus of sand of 2.80, 0.71 ft³ of coarse aggregate, on a dry-rodded basis, would be required in each cubic foot of concrete having a slump of about 3 to 4 in.

In Fig. 3.3, for the very stiff consistency desired, the amount of coarse aggregate should be 125% of that for the plastic consistency, or $0.71 \times 1.25 = 0.89$. The quantity in a cubic yard will be $27 \times 0.89 = 24.03$ ft³, which in this case is 100×24.03 , or 2403 lb.

With the quantities of cement, water, coarse aggregate, and air established, the sand content is calculated as follows:

Solid volume of cement	=	$[523 / (3.15 \times 62.4)]$	=	2.66 ft ³
Volume of water	=	$[225 / 62.4]$	=	3.61 ft ³
Solid volume of coarse aggregate	=	$[2403 / (2.68 \times 62.4)]$	=	14.37 ft ³
Volume of air	=	27.00×0.030	=	0.81 ft ³
Total volume of ingredients except sand			=	21.45 ft ³
Solid volume of sand required	=	$[27.00 - 21.45]$	=	5.55 ft ³
Required weight of oven-dry sand	=	$[5.55 \times 2.64 \times 62.4]$	=	914 lb
Water absorbed	=	$[(914 \times 0.007) + (2403 \times 0.005)]$	=	18 lb

The estimated batch quantities per cubic yard of concrete are:

Cement	=	523 lb
Water	=	243 lb (225 + 18)
Sand, oven-dry	=	914 lb
Coarse aggregate, oven-dry	=	2403 lb
Air-entraining admixture	=	(as required) for 3% air

A1.3—Batching quantities for production use

For the sake of convenience in making trial mixture computations, the aggregates have been assumed to be in an oven-dry state. Under production conditions they generally will be moist and the quantities to be batched into the mixer must be adjusted accordingly.

With the batch quantities determined in the example, let it be assumed that tests show the total moisture of sand to be 5.0 and 1.0% for the coarse aggregate. Because the quantity of oven-dry sand required was 914 lb, the amount of moist sand to be weighed out must be $914 \times 1.05 = 960$ lb. Similarly, the weight of moist coarse aggregate must be $2403 \times 1.01 = 2427$ lb.

The free water in the aggregates, in excess of their absorption, must be considered as part of the mixing water. Because the absorption of sand is 0.7%, the amount of free water which it contains is $5.0 - 0.7 = 4.3\%$. The free water in the coarse aggregate is $1.0 - 0.5 = 0.5\%$. Therefore, the mixing water contributed by the sand is $0.043 \times 914 = 39$ lb and that contributed by the coarse aggregate is $0.005 \times 2403 = 12$ lb.

Table A1.1—Comparison between computed batch quantities and those used in production

Ingredients	Batch quantities of concrete per cubic yards	
	Computed, lb	Used in production, lb
Cement	523	523
Net mixing water	225	225
Sand	914 (dry)	960 (moist)
Coarse aggregate	2403 (dry)	2427 (moist)
Water absorbed	18	—
Excess water	—	-51
Total	4083	4084
Water added at mixer	243	174

The quantity of mixing water to be added, then, is $225 - (39 + 12) = 174$ lb. Table A1.1 shows a comparison between the computed batch quantities and those actually to be used in the field for each cubic yard of concrete.

The preceding computations provide batch quantities for each ingredient of the mixture per cubic yard of concrete. It is seldom desirable or possible to mix concrete in exactly 1 yd³ batches. It is therefore necessary to convert these quantities in proportion to the batch size to be used. Let it be assumed that a 16 ft³ capacity mixer is available. To produce a batch of the desired size and maintain the same proportions, the cubic yard batch quantities of all ingredients for the project must be reduced in the ratio $16/27 = 0.593$, thus:

$$\begin{aligned}\text{Cement} &= 0.593 \times 523 = 310 \text{ lb} \\ \text{Sand (moist)} &= 0.593 \times 960 = 569 \text{ lb} \\ \text{Coarse aggregate (moist)} &= 0.593 \times 2427 = 1444 \text{ lb} \\ \text{Water to be added} &= 0.593 \times 174 = 103 \text{ lb}\end{aligned}$$

A1.4—Adjustment of trial mixture

The estimate of total water requirement given in Fig. 2.1 and 2.2 may underestimate the water required. In such cases, the amount of cementitious materials should be increased to maintain the w/cm , unless otherwise indicated by laboratory tests. This adjustment will be illustrated by assuming that the concrete for the example was found in the field trial batch to require 240 lb/yd³ of mixing water instead of 225 lb/yd³. Consequently, the cementitious materials content should be increased from 523 to $(240/225) \times 523 = 558$ lb/yd³ and the batch quantities recomputed accordingly.

Sometimes less water than indicated in Fig. 2.1 and 2.2 may be required, but it is recommended that no adjustment be made in the amount of cementitious materials for the batch in progress. Strength results may warrant additional batches with less cementitious materials. Adjustment in batch quantities is necessary to compensate for the loss of volume due to the reduced water. This is done by increasing the solid volume of sand in an amount equal to the volume of the reduction in water. For example, assume that 215 lb of water are required instead of 225 lb for the concrete of the example. Then $215/62.4$ is substituted for $225/62.4$ in computing the volume of water in the batch, and the solid volume of sand becomes 5.71 instead of 5.55 ft³.

APPENDIX 2—LABORATORY TESTS

A2.1—General

As stated in the Introduction, selection of concrete mixture proportions can be accomplished most effectively from results of laboratory tests that determine basic physical properties of materials needed for proportioning no-slump concrete mixtures; that establish relationships between w/cm , air content, cement content, and strength; and which furnish information on the workability characteristics of various combinations of ingredient materials. The extent of investigation of fresh and hardened concrete properties for any given job will depend on the size of the project, and importance and service conditions involved. Details of the laboratory program will also vary depending on facilities available and on individual preferences.

A2.2—Physical properties of cement

Physical and chemical characteristics of cement influence the properties of hardened concrete. The only property of cement directly concerned in computation of concrete mixture proportions is specific gravity. The specific gravity of cement may be assumed to be 3.15 without introducing appreciable error in mixture computations.

A sample of cement of the type selected for the project should be obtained from the mill that will supply the job. The sample quantity should be adequate for tests contemplated with a liberal margin for additional tests that might later be considered desirable. Cement samples should be shipped in airtight containers or in moisture-proof packages.

A2.3—Properties of aggregate

Sieve analysis, specific gravity, absorption, and moisture content of both fine and coarse aggregate and dry-rodded density of coarse aggregate are essential physical properties required for mixture computations. Other tests that may be desirable for large or special types of work include petrographic examination, tests for chemical reactivity and soundness, durability, resistance to abrasion, and for various deleterious substances. All such tests yield valuable information for judging the ultimate quality of concrete and in selecting appropriate proportions.

Aggregate grading or particle-size distribution is a major factor in controlling unit water requirement, proportion of coarse aggregate to sand, and cement content of concrete mixtures for a given degree of workability. Numerous "ideal" aggregate grading curves have been proposed, but a universally accepted standard has not been developed. Experience and individual judgment must continue to play important roles in determining acceptable aggregate gradings. Additional workability, realized by use of air entrainment, permits the use of less restrictive aggregate gradings to some extent.

Undesirable sand gradings may be corrected to desired particle size distribution by:

- Separation of the sand into two or more size fractions and recombining in suitable proportions;
- Increasing or decreasing the quantity of certain sizes to balance the grading;
- Reducing excess coarse material by grinding; or

- By the addition of manufactured sand.
- Undesirable coarse aggregate gradings may be corrected by:
- Crushing excess coarser fractions;
 - Wasting excess material in other fractions;
 - Supplementing deficient sizes from other sources; or
 - A combination of these methods.

The proportions of various sizes of coarse aggregate should be held closely to the grading of available materials to minimize the amount of waste material. Whatever processing is done in the laboratory should be practical from a standpoint of economy and job operation. Samples of aggregates for concrete mixture tests should be representative of aggregate selected for use in the work. For laboratory tests, the coarse aggregates should be cleanly separated into required size fractions to provide for uniform control of mixture proportions.

The particle shape and texture of both fine and coarse aggregate also influence the mixing water requirement of concrete. Void content of compacted dry, fine, or coarse aggregate can be used as an indicator of angularity. Void contents of more than 40% in conventionally graded aggregates indicate angular material that will probably require more mixing water than given in Fig. 2.1 and 2.2. Conversely, rounded aggregates with voids below 35% will probably need less water.

A2.4—Concrete mixture tests

The values listed in the figures (2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, and 3.3) can be used for establishing a preliminary trial mixture. They are based on averages obtained from a large number of tests and do not necessarily apply exactly to materials being used on a particular job. If facilities are available, it is advisable to make a series of concrete tests to establish the relationships needed for selection of appropriate proportions based on the materials actually to be used.

Air-entrained concrete or concrete with no measurable slump must be machine-mixed. Before mixing the first batch, the laboratory mixer should be "battered," as described in ASTM C 192/ C 192 M, because a clean mixer retains a percentage of mortar that should be taken into account. Similarly, any processing of materials in the laboratory should simulate, as closely as practicable, corresponding treatment in the field. Adjustments of the preliminary trial mixture will almost always be necessary. It should not be expected that field results will check exactly with laboratory results. An adjustment of the selected trial mixture on the job is usually necessary.

Some of the variables that may require a more extensive program are alternative aggregate sources and different aggregate gradings, different types and brands of cement, different admixtures, different nominal maximum sizes of aggregate, considerations of concrete durability, thermal properties, and volume change, which includes drying shrinkage and temperature due to cement hydration.

A2.5—Specifications and test methods

Appropriate specifications and test methods for the various ingredients in concrete and for freshly mixed and hardened



Fig. A2.1—Modified Vebe apparatus. Photograph provided by Soiltest Division, ELE International.

concrete are published by the American Society for Testing and Materials, the American Association of State Highway and Transportation Officials, and various Federal and State agencies. A list of useful test methods is shown in the appendix to ACI 211.1.

A2.6—Equipment and techniques for measuring consistency

The following is a more detailed description of the equipment and techniques involved in a method for measuring consistency described in Section 2.2.

A2.7—Vebe apparatus

The Vebe apparatus consists of a heavy base, resting on three rubber feet, a vibrating table supported on rubber shock absorbers, a motor with rotating eccentric mass, a cylindrical metal container to hold the concrete sample (approximate inside dimensions: 240 mm [9-1/2 in.] in diameter and 195 mm [7-3/4 in.] high), a slump cone (ASTM C 143/ C 143 M), a funnel for filling the slump cone, a swivel arm holding a graduated metal rod, and a clear plastic disk (diameter of disk slightly less than diameter of cylindrical metal container). The vibrating table is typically 380 mm (15 in.) in length, 260 mm (10-1/4 in.) in width, and 300 mm (12 in.) in height. The overall width, with the disk swung away from the container, is 675 mm (26-1/2 in.). The overall height

- By the addition of manufactured sand.
- Undesirable coarse aggregate gradings may be corrected by:
- Crushing excess coarser fractions;
 - Wasting excess material in other fractions;
 - Supplementing deficient sizes from other sources; or
 - A combination of these methods.

The proportions of various sizes of coarse aggregate should be held closely to the grading of available materials to minimize the amount of waste material. Whatever processing is done in the laboratory should be practical from a standpoint of economy and job operation. Samples of aggregates for concrete mixture tests should be representative of aggregate selected for use in the work. For laboratory tests, the coarse aggregates should be cleanly separated into required size fractions to provide for uniform control of mixture proportions.

The particle shape and texture of both fine and coarse aggregate also influence the mixing water requirement of concrete. Void content of compacted dry, fine, or coarse aggregate can be used as an indicator of angularity. Void contents of more than 40% in conventionally graded aggregates indicate angular material that will probably require more mixing water than given in Fig. 2.1 and 2.2. Conversely, rounded aggregates with voids below 35% will probably need less water.

A2.4—Concrete mixture tests

The values listed in the figures (2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, and 3.3) can be used for establishing a preliminary trial mixture. They are based on averages obtained from a large number of tests and do not necessarily apply exactly to materials being used on a particular job. If facilities are available, it is advisable to make a series of concrete tests to establish the relationships needed for selection of appropriate proportions based on the materials actually to be used.

Air-entrained concrete or concrete with no measurable slump must be machine-mixed. Before mixing the first batch, the laboratory mixer should be "battered," as described in ASTM C 192/ C 192 M, because a clean mixer retains a percentage of mortar that should be taken into account. Similarly, any processing of materials in the laboratory should simulate, as closely as practicable, corresponding treatment in the field. Adjustments of the preliminary trial mixture will almost always be necessary. It should not be expected that field results will check exactly with laboratory results. An adjustment of the selected trial mixture on the job is usually necessary.

Some of the variables that may require a more extensive program are alternative aggregate sources and different aggregate gradings, different types and brands of cement, different admixtures, different nominal maximum sizes of aggregate, considerations of concrete durability, thermal properties, and volume change, which includes drying shrinkage and temperature due to cement hydration.

A2.5—Specifications and test methods

Appropriate specifications and test methods for the various ingredients in concrete and for freshly mixed and hardened



Fig. A2.1—Modified Vebe apparatus. Photograph provided by Soiltest Division, ELE International.

concrete are published by the American Society for Testing and Materials, the American Association of State Highway and Transportation Officials, and various Federal and State agencies. A list of useful test methods is shown in the appendix to ACI 211.1.

A2.6—Equipment and techniques for measuring consistency

The following is a more detailed description of the equipment and techniques involved in a method for measuring consistency described in Section 2.2.

A2.7—Vebe apparatus

The Vebe apparatus consists of a heavy base, resting on three rubber feet, a vibrating table supported on rubber shock absorbers, a motor with rotating eccentric mass, a cylindrical metal container to hold the concrete sample (approximate inside dimensions: 240 mm [9-1/2 in.] in diameter and 195 mm [7-3/4 in.] high), a slump cone (ASTM C 143/ C 143 M), a funnel for filling the slump cone, a swivel arm holding a graduated metal rod, and a clear plastic disk (diameter of disk slightly less than diameter of cylindrical metal container). The vibrating table is typically 380 mm (15 in.) in length, 260 mm (10-1/4 in.) in width, and 300 mm (12 in.) in height. The overall width, with the disk swung away from the container, is 675 mm (26-1/2 in.). The overall height

above floor level from the top edge of the funnel used to fill the slump cone is approximately 710 mm (28 in.). The total mass of the equipment is approximately 95 kg (210 lb). Figure A2.1 shows the apparatus mounted on a concrete pedestal approximately 380 mm (15 in.) in height.

To carry out the Vebe test device shown in Fig. A2.1, the sample of concrete is compacted in the slump cone, the top struck off, the cone removed, and the slump measured, as per ASTM C 143/ C 143 M. The swivel arm is then moved into position with the clear plastic disk and graduated rod resting on top of the concrete sample. The vibrator is switched on and the time in seconds to deform the cone into a cylinder, at which stage the whole face of the plastic disk is in contact with the concrete, is determined. This time in seconds is used as a measure of the consistency of the concrete.

APPENDIX 3—ROLLER-COMPACTED CONCRETE MIXTURE PROPORTIONING

A3.1—General

Roller-compacted concrete (RCC) is defined in ACI 116R as "concrete compacted by roller compaction; concrete that in its unhardened state will support a roller while being compacted." Conventional concrete cannot generally be repositioned for use as RCC by any single action, such as altering the proportions of mortar and coarse aggregate, reducing the water content, changing the w/cm , or increasing the fine aggregate content. Differences in conventional portland cement concrete and RCC mixture proportioning procedures are primarily due to the relatively dry consistency of RCC and the possible use of un conventionally graded aggregates.

This guide describes methods for selecting proportions for RCC mixtures for use in mass concrete and horizontal concrete slab or pavement construction applications. The methods provide a first approximation of proportions intended to be checked by trial batches in the laboratory or field, and adjusted, as necessary, to produce the desired characteristics of the RCC. Additional information on RCC can be found in ACI 207.5R and ACI 325.10R.

A3.2—Consistency

For RCC to be effectively consolidated, it must be dry enough to support the weight mass of a vibratory roller yet wet enough to permit adequate compaction of the paste throughout the mass during the mixing and compaction operations. Concrete suitable for compaction with vibratory rollers differs significantly in appearance in the unconsolidated state from that of concrete having a measurable slump. There is little evidence of any paste in the mixture except for coating on the aggregate until it is consolidated. RCC mixtures should have sufficient paste volume to fill the internal voids in the aggregate mass and therefore may differ from related materials such as soil cement or cement-treated base course.

Although the slump test is the most familiar means of measuring concrete consistency in the United States and is the basis for the measures of consistencies shown in ACI 211.1, it is not suitable to measure RCC consistency. RCC will have poor workability if compaction by hand-rodging is attempted.

If vibration is used, however, the workability characteristics of the same concrete might be considered as excellent. The range of workable mixtures can be broadened by adopting compaction techniques that impart greater energy into the mass to be consolidated. The standard test method for measuring the consistency of RCC is ASTM C 1170, which uses the modified Vebe apparatus.

The modified Vebe apparatus shown in Fig. A2.1 consists of a vibrating table of fixed frequency and amplitude, with a 0.009 m^3 (0.33 ft^3) container attached to the table. A representative sample of RCC is loosely placed in the container under a surcharge of 23 kg (50 lb). The measure of consistency is the time of vibration, in seconds, required to fully consolidate the concrete, as evidenced by the formation of a ring of mortar between the edge of the surcharge and the wall of the container. The Vebe time is normally determined for a given RCC mixture and compared with the field results of onsite compaction tests conducted with vibratory rollers to determine if adjustments in the mixture proportions are necessary. The optimum Vebe time is influenced by the mixture proportions, particularly the water content, nominal maximum aggregate size, fine aggregate content, and the amount of aggregate finer than the 75 μm (No. 200) sieve.

A3.3—Durability

Although the resistance of RCC to deterioration due to cycles of freezing and thawing has been good in some pavements and other structures, RCC should not be considered resistant to freezing and thawing unless it is air-entrained or some other protection against critical saturation is provided. If the RCC does not contain a sufficiently fluid paste, proper air entrainment will be difficult, if not impossible, to achieve. In addition, a test method for measuring the air content of fresh RCC has not been standardized.

Other ways of protecting RCC from frost damage in mass concrete applications may include sacrificial RCC on exposed surfaces, a conventional air-entrained concrete facing, or some means of membrane protection.

RCC produced with significant amounts of clay will check and crack when exposed to alternating cycles of wetting and drying, while that proportioned with nonplastic aggregate fines generally experiences no deterioration.

A3.4—Strength

The strength of compacted RCC, assuming the use of consistent quality aggregates, is determined by the water-cement ratio (w/c). Differences in strength and degree of consolidation for a given w/cm can result from changes in maximum size of aggregate; grading, surface texture, shape, strength, and stiffness of aggregate particles; differences in cement types and sources; entrapped air content; and the use of admixtures that affect the cement hydration process or develop cementitious properties themselves. ASTM C 1176 is the standard method practice for fabricating test specimens, which involves molding specimens by filling the molds in layers and consolidating each layer of RCC under a surcharge on a vibrating table.

A3.5—Selection of materials

A3.5.1 General—Materials used to produce RCC consist of cementitious materials, water, fine and coarse aggregate, and sometimes chemical admixtures. Materials and mixture proportions used in various projects to date have ranged from pit- or bank-run, minimally processed, aggregates with low cementitious material contents, to fully processed concrete aggregates having normal size separations and high cementitious materials contents. Mixture proportions and materials selection criteria for RCC in massive concrete applications are based on the need to provide bond between layers while still maintaining a cementitious material content low enough to minimize temperature rise due to the heat of hydration that can cause thermal cracking when the RCC cools quickly. The specified strength, durability requirements, and intended application affect the materials selected for use in RCC slabs and pavements.

A3.5.2 Cementitious materials—Cementitious materials used in RCC can include portland cement, blended hydraulic cements, or a combination of portland cement and pozzolans. The selection of cement types should be based in part on the design strength and the age at which this strength is required. In addition, applicable limits on chemical composition required for different exposure conditions and alkali reactivity should follow standard concrete practices. For massive RCC structures, the use of cement with heat of hydration limitations is recommended. A detailed discussion of cementitious materials for use in mass concrete is found in ACI 207.1R.

Selection of a pozzolan suitable for use in RCC should be based on conformance with applicable standards or specifications, its performance in the concrete, and its availability to the project location. Pozzolans have been successfully used in RCC to reduce heat generation, increase ultimate strength beyond 180 days age, and increase the paste volume of mixtures to improve compaction characteristics. The use of fly ash is a particularly effective means of providing additional fine material to aid in the compaction of those RCC mixtures that contain standard graded concrete fine aggregate.

A3.5.3 Aggregates—The aggregates generally comprise 75 to 85% of the volume of an RCC mixture, depending on the intended application, and significantly affect both the fresh and hardened concrete properties. In freshly mixed RCC, aggregate properties affect the workability of a mixture and its potential to segregate, which in turn affects the ability of the mixture to consolidate under a vibratory roller. Aggregate properties also affect hardened concrete characteristics such as strength, elastic and thermal properties, and durability. The aggregate grading and particle shape affect the paste requirement of an RCC mixture. For high-quality RCC, both the coarse and fine aggregate fractions should be composed of hard, durable particles, and the quality of each should be evaluated by standard physical property tests such as those given in ASTM C 33. If lower-quality RCC is acceptable, then a variety of aggregate sources that may not meet ASTM grading and quality requirements may be satisfactory as long as design criteria are met. For example, in stiff, lean RCC mixtures to be used in massive sections,

broad limits for some deleterious substances than those specified in ASTM may be acceptable.

Greater economy may be realized by using the largest practical nominal maximum-size aggregate (NMSA). Increasing the NMSA reduces the void content of the aggregate and thereby lowers the paste requirement of a mixture. Lower cementitious material contents, in turn, reduce the potential for cracking due to thermal stress in massive sections. The disadvantages of increasing the NMSA are primarily associated with RCC mixing and handling problems. In the United States, the NMSA has generally been limited to 25.0 mm (1 in.) in RCC produced for horizontal applications such as pavements and slabs, and to 75 mm (3 in.) in RCC used in massive sections.

The range in gradings of aggregate used in RCC mixtures has varied from standard graded concrete aggregate with normal size separations to pit- or bank-run aggregate with little or no size separation. Changes in consistency and workability are affected by changes in aggregate grading. The relative compactability of RCC is also affected by the aggregate grading and fines content.

The volume of coarse aggregate in an RCC mixture directly affects the effort required to compact the mixture. Assuming an adequate volume of paste is available in the mixture, a wide range of coarse and fine aggregate gradings is not likely to significantly affect the densities achieved in the field. For RCC pavement applications in which longitudinal and transverse pavement smoothness are of importance, the coarse and fine aggregates should be combined so that a dense-graded aggregate blend is produced that approaches a maximum-density grading. Equation (A3.1), the equation for Fuller's maximum density curve, gives an approximate cumulative percentage of material finer than each sieve. This grading results in a mixture that is compactible yet stable under the roller.

$$P = (d/D)^{1/2}(100) \quad (A3.1)$$

where

- P = cumulative percent finer than the d -size sieve;
- d = sieve opening, mm (in.); and
- D = NMSA, mm (in.).

In areas where pozzolans are not readily available, the use of blended sands or mineral fines can be a beneficial means of reducing or filling aggregate voids; in some instances, however, their use can also increase the amount of water required to achieve the consistency needed to ensure thorough consolidation. The effects of these materials on the RCC mixture proportions should be evaluated by determining their effect on minimum paste volume requirements or by evaluation of test specimens for strength, shrinkage, or both.

A3.5.4 Admixtures—Chemical admixtures, including water-reducing and retarding admixtures, have experienced wide use in RCC placed in massive sections, but their use has been more limited in pavement applications. The ability of these admixtures to lower the water requirements

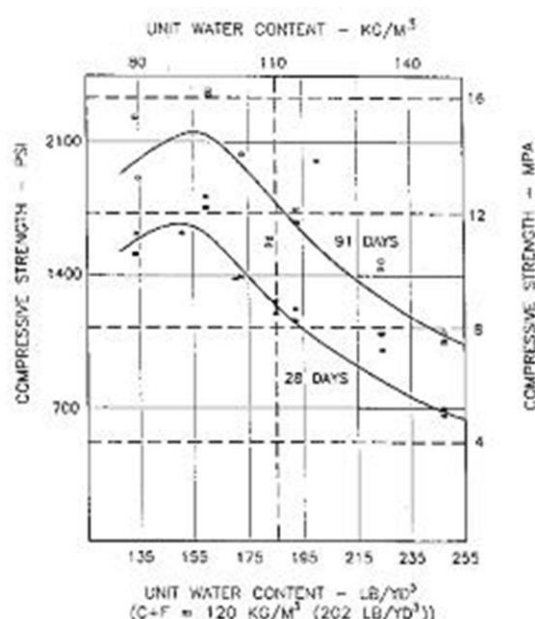


Fig. A3.1—Relation between unit water content and compressive strength of mass concrete.

or to provide extended workability to a mixture appears to be largely dependent on the amount and type of aggregate finer than the 75 μm (No. 200) sieve. Air-entraining admixtures have seen limited use in RCC. Conventional methods of adding air-entraining admixtures at the mixer have only been marginally successful in entraining proper air-void systems in lean RCC mixtures. Limited data have shown, however, that if air can be entrained in RCC, significant improvements in resistance to freezing and thawing can be achieved.

A3.6—Selection of mixture proportions

A3.6.1 General—A number of RCC mixture proportioning methods have been successfully used to produce mixtures for mass concrete applications and pavements and other horizontal concrete construction applications. These methods have differed significantly for a number of reasons. One significant reason has been the philosophy of the treatment of the aggregates as either conventional concrete aggregates or as aggregates used in the placement of stabilized materials.

Two methods are described herein for selecting proportions for RCC mixtures. The first is recommended primarily for use in selecting proportions of lean mixtures, which typically contain a 37.5 mm (1-1/2 in.) or larger NMSA and are intended for use in relatively massive sections. The second method is recommended primarily to proportion mixtures for relatively thin sections such as pavements or slabs. The former method is based on proportioning RCC to meet specified limits of consistency, and the latter method is based on proportioning RCC, using soil's compaction concepts. Although RCC designed for use in horizontal concrete con-

struction applications can be proportioned using the first method, the second method is limited for use on those mixtures containing 19 mm (3/4 in.) or smaller NMSA. Proportions determined by the use of either procedure should result in mixtures that contain sufficient paste volume to fill voids between aggregate particles and coat individual aggregate particles.

A3.6.2.1 Procedure for proportioning RCC to meet specified limits of consistency—This method uses the modified Vebe test, as previously described in Section A3.2, as the basis for determining optimum workability and aggregate proportions. The vibration time for full consolidation is measured and compared with field-compaction tests conducted with vibratory rollers. The desired time is determined based on the results of density tests and evaluation of cores. The vibration time is influenced by a number of parameters of the mixture, including water content, combined aggregate grading, NMSA, fine aggregate content, and content of material finer than the 75 μm (No. 200) sieve. Mixtures that contain relatively clean concrete sands and fixed aggregate grading in lines 18 and 19 with 38 mm (1-1/2 in.) NMSA generally require 15 to 30 s to fully consolidate. Those mixtures containing clean sands, fixed aggregate grading, and 19 mm (3/4 in.) or smaller NMSA to be used for horizontal construction applications require approximately 35 to 50 s to fully consolidate.

A3.6.2.2 Water content—Those mixtures with paste volumes in excess of aggregate void volumes will fully consolidate to approximately 98% of their theoretical densities as defined by ASTM C 138. Variations in mixture water contents will directly affect the compactive effort required to achieve full consolidation. The optimum water content of a given mixture is that whose variability has the least effect on compactive effort for full consolidation. If the water content of a mixture is too low, the aggregate voids will no longer be filled with paste and the strength of the mixture will decrease even though the w/cm has decreased. Figure A3.1 shows an example of the variation in strength with water content for a fixed cementitious materials content.

A3.6.2.3 Cementitious material content—The cementitious material content used in RCC mixtures depends on the specified strength, bond requirement between layers, and thermal considerations. For a given cementitious materials content, the strength at a given age will be maximized when the paste volume is just enough to fill the aggregate voids. Strength will be reduced if the paste volume is not sufficient to fill the entrapped air voids or if the water content is increased to a point that creates excess paste but a higher w/cm . Therefore, as the paste content increases, the water content can be reduced and strength optimized without losing workability. For most ASTM C 150 Type I or II cements, Fig. A3.2 can be used as a guide to proportion equal-strength RCC for varying proportions of portland cement and ASTM C 618 Class F pozzolans. Similar results can be expected with other pozzolans. The use of mortar compressive strength tests have also been found to be a suitable means of determining the w/cm required for strength considerations. Once mortar is proportioned to meet strength requirements, varying percentages of mortar

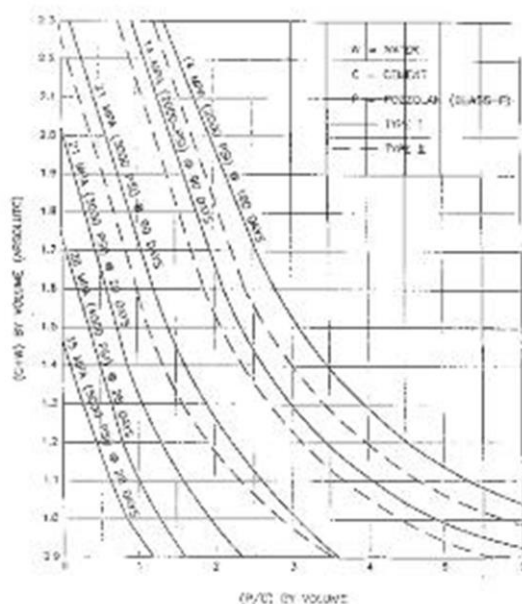


Fig. A3.2—Proportioning curves for equal-strength concrete.

Table A3.1—Recommended absolute volumes of coarse aggregate per unit volume of RCC

NMSA ^a , mm (in.)	Absolute volume, % of unit RCC volume
150 (6)	63 to 64
115 (4-1/2)	61 to 63
75 (3)	57 to 61
37.5 (1-1/2)	52 to 56
19 (3/4)	46 to 52
9.5 (3/8)	42 to 48

^aNMSA = nominal maximum size aggregate.

and coarse aggregate can be proportioned to achieve a given workability as measured by Vebe time. These determinations are based upon the mortar required per unit volume of RCC.

A3.6.2.4 Fine aggregate content—The void content of fine aggregate, as determined in dry-rodded density measurements, normally ranges from 34 to 42%. The minimum paste volume can be determined by maximum density curves in much the same way as optimum water content is determined in soils. Fine aggregate is added in equal increments to paste proportioned at the w/c determined for the mixture, and specimen density measurements are made using ASTM D 1557 or extended vibration. The density values are plotted versus the calculated paste volumes and the paste volume producing the maximum density of the mortar specimens may be determined. The paste volume, as a ratio of the total mortar volume, should be increased from 5 to 10% for mass concrete mixtures, and 20 to 25% for those mixtures designed for use when a bonding mortar is not used between horizontal lifts of RCC.

Table of notation

p/c	volumetric ratio of pozzolan to cement
P_T	minimum paste content
P_v	ratio of air-free volume of paste to air-free volume of mortar
V_{CA}	volume of coarse aggregate
V_A	volume of air in mixture
C_v	unit volume of concrete upon which proportions are based
V_p	air-free volume of paste
V_{MT}	total mortar volume
V_m	air-free volume of mortar
V_{FA}	volume of fine aggregate
V_w	volume of water
V_c	volume of cement
V_p	volume of pozzolan
$w/c+p$	volumetric ratio of water to cement plus pozzolan

A3.6.2.5 Coarse aggregate content—For any NMSA, the minimum aggregate volume to produce no-slump consistency can be determined by proportioning the mortar fraction to yield the approximate strength that is required and then adjusting the proportions of coarse aggregate and mortar to achieve a zero slump. Once the coarse aggregate-mortar ratio that yields zero slump is determined, the coarse aggregate can be increased until the ratio is reached that results in the desired modified Vebe time. The absolute volume for coarse aggregate per unit volume of RCC will generally fall within the limits of Table A3.1.

A3.6.3 Proportioning steps

Step 1—Select the volumetric pozzolan-cement ratio (p/c) and $w/c+p$ from Fig. A3.2 for the production of trial mortar and concrete batches.

Step 2—Determine the minimum paste content P_T as a percentage of the total mortar volume using procedures previously discussed. As an alternative, the ratio of the air-free volume of paste to the air-free volume of mortar, P_v , in the range of 0.38 to 0.46 can be selected. Careful attention should be given to selecting this value if it is not based on specific test results.

Step 3—Determine the volume of coarse aggregate, V_{CA} , by trial methods as previously discussed until the desired modified Vebe time is obtained or by selection from Table A3.1.

Step 4—Assume the entrapped air content is 1.0 to 2.0% of the total concrete volume. Calculate the volume of air in the mixture from

$$V_A = (\text{air content}/100) \times C_v$$

Step 5—Calculate the air-free volume of paste, V_p , from

$$V_p = (P_T/100 \times V_{MT}) - V_A$$

where V_{MT} = Total mortar volume = $C_v - V_{CA}$

Or if a value of P_v is selected in Step 2

$$V_p = V_m \times P_v$$

where V_m = air-free volume of mortar

$$V_m = C_v - V_{CA} - V_A$$

Step 6—Determine the fine aggregate volume, V_{FA} , from

$$V_{FA} = C_v - V_{CA} - V_p - V_A$$

or

$$V_{FA} = V_m \times (1 - P_v)$$

Step 7—Determine the trial water volume, V_W , from

$$V_W = V_P \times w/(c+p) / [1 + w/(c+p)]$$

where:

$w/c+p$ = water-cementitious materials ratio, by volume (Fig. A3.2).

Step 8—Determine the cement volume, V_C , from

$$V_C = V_W / \{w/(c+p) \times [1 + (p/c)]\}$$

Step 9—Determine the pozzolan volume, V_F , from

$$V_F = V_C \times (p/c)$$

Step 10—Calculate the mass of each material by multiplying its absolute volume by its respective solid bulk density.

Step 11—Perform consistency tests on trial batches as previously discussed to achieve the desired modified Vebe time or to determine the minimum vibration duration needed to achieve maximum compacted density.

Step 12—After the final aggregate volumes are selected, proportion at least two additional batches—one having a higher and one having a lower $w/c+p$. Plot strength versus $w/c+p$ to determine the final mixture proportions.

A3.6.4 Example problem—Concrete is required for a large, 1200 mm (48 in.) thick overflow slab located in a moderate exposure environment. The specified compressive strength is 14 MPa (2000 psi) at 90 days. Water velocities will be less than 12 m/s (40 ft/s), and the concrete will be continuously submerged. No reinforcement is required and the area is accessible to large equipment. Placement conditions allow the use of 75 mm (3 in.) NMSA. Three coarse-aggregate size groups, consisting of 4.75 to 19 mm (No. 4 to 3/4 in.), 19 to 37.5 mm (3/4 to 1-1/2 in.), and 37.5 to 75 mm (1-1/2 to 3 in.), will be used in the concrete. These coarse aggregates will be combined in the proportions of 34, 26, and 40% by volume, respectively, to match the idealized combined grading given in ACI 211.1. Type II portland cement and Class F fly ash are available and will be specified. Proportion an RCC mixture having a modified Vebe time of 15 to 20 s, which will achieve the specified compressive strength.

Step 1—An initial mixture will be proportioned with $p/c = 3$. (Subsequent mixtures would also likely be proportioned with other p/c s). From Fig. A3.2, $w/(c+p) = 1.3$ by volume.

Step 2—Based upon previous experience, a value of $P_v = 0.39$ is selected for the ratio of air-free volume of paste to the air-free volume of mortar.

Steps 3–10 are presented in SI units and are repeated in inch-pound units, which are shown in the framed text.

Step 3—From Table A3.1, the percentage of aggregate, by absolute volume, per unit volume of concrete is selected to be 59. Therefore,

$$V_{ca} = 0.59 \times 1 \text{ m}^3 = 0.59 \text{ m}^3$$

and

$$4.75 \text{ to } 19 \text{ mm} = 0.34 \times 0.59 \text{ m}^3 = 0.201 \text{ m}^3$$

$$19 \text{ to } 37.5 \text{ mm} = 0.26 \times 0.59 \text{ m}^3 = 0.153 \text{ m}^3$$

$$37.5 \text{ to } 75 \text{ mm} = 0.40 \times 0.59 \text{ m}^3 = 0.236 \text{ m}^3$$

Step 4—An entrapped air content of 1.0% is assumed. The volume of air, V_A , is:

$$V_A = (1.0/100) \times 1 \text{ m}^3 = 0.01 \text{ m}^3$$

Step 5—The air-free volume of mortar, V_m , is:

$$V_m = 1 \text{ m}^3 - (0.59 \times 1 \text{ m}^3) - 0.01 \text{ m}^3$$

$$= 0.40 \text{ m}^3$$

The value of V_P is:

$$V_P = 0.40 \text{ m}^3 \times 0.39 = 0.156 \text{ m}^3$$

Step 6—The fine aggregate volume, V_{FA} , is:

$$V_{FA} = 0.40 \text{ m}^3 \times (1 - 0.39) = 0.244 \text{ m}^3$$

Step 7—The volume of water, V_W , is:

$$V_W = (0.156 \times 1.3) / (1 + 1.3) = 0.088 \text{ m}^3$$

Step 8—The volume of cement, V_C , is:

$$V_C = 0.088 / [1.3 \times (1 + 3)] = 0.017 \text{ m}^3$$

Step 9—The volume of fly ash, V_F , is:

$$V_F = 0.017 \times 3 = 0.051 \text{ m}^3$$

Step 10—The bulk density (saturated surface dry basis) of each of the materials is:

$$\text{cement} = 3150 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{fly ash} = 2300 \text{ kg/m}^3$$

$$4.75 \text{ to } 19 \text{ mm} = 2710 \text{ kg/m}^3$$

$$19 \text{ to } 37.5 \text{ mm} = 2730 \text{ kg/m}^3$$

$$37.5 \text{ to } 75 \text{ mm} = 2730 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{fine aggregate} = 2690 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{water} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Then the mass of each material (saturated-surface dry basis) required for 1 m³ of concrete is (volume in proportions $\times$ bulk density):

$$\text{cement} = 54 \text{ kg}$$

$$\text{fly ash} = 117 \text{ kg}$$

$$4.75 \text{ to } 19 \text{ mm} = 545 \text{ kg}$$

$$19 \text{ to } 37.5 \text{ mm} = 418 \text{ kg}$$

$$37.5 \text{ to } 75 \text{ mm} = 644 \text{ kg}$$

$$\text{fine aggregate} = 656 \text{ kg}$$

$$\text{water} = 88 \text{ kg}$$

Step 11—A sample taken from the trial batch indicates the modified Vebe time is only 11 s. Adjust the trial mixture proportions by either increasing P_v or decreasing V_{CA} , or both, and recalculate the material absolute volumes and masses.

Step 12—After the aggregate volumes are finalized, proportion two additional mixtures; one having a higher and one having a lower $w/(c+p)$. Plot compressive strength versus $w/(c+p)$ to determine the final mixture proportions.

Steps 3–10 in inch-pound units

Step 3—From Table A3.1, the percentage of aggregate, by absolute volume, per unit volume of concrete is selected to be 59. Therefore,

$$V_{ca} = 0.59 \times 27 \text{ ft}^3 = 15.93 \text{ ft}^3$$

and

$$\text{No. 4 to } 3/4 \text{ in.} = 0.34 \times 15.93 \text{ ft}^3 = 5.42 \text{ ft}^3$$

$$3/4 \text{ to } 1-1/2 \text{ in.} = 0.26 \times 15.93 \text{ ft}^3 = 4.14 \text{ ft}^3$$

$$1-1/2 \text{ to } 3 \text{ in.} = 0.4 \times 15.93 \text{ ft}^3 = 6.37 \text{ ft}^3$$

Step 4—An entrapped air content of 1.0% is assumed. The volume of air, V_A , is:

$$V_A = (1.0/100) \times 27 \text{ ft}^3 = 0.27 \text{ ft}^3$$

Step 5—The air-free volume of mortar, V_m , is:

$$V_m = 27 \text{ ft}^3 - (0.59 \times 27 \text{ ft}^3) - 0.27 \text{ ft}^3$$

The value of V_P is:

$$V_P = 10.80 \text{ ft}^3 \times 0.39 = 4.22 \text{ ft}^3$$

Step 6—The fine aggregate volume, V_{FA} , is:

$$V_{FA} = 10.80 \text{ ft}^3 \times (1 - 0.39) = 6.59 \text{ ft}^3$$

Step 7—The volume of water, V_W , is:

$$V_W = (4.22 \times 1.3)/(1 + 1.3) = 2.39 \text{ ft}^3$$

Step 8—The volume of cement, V_C , is:

$$V_C = 2.39/[1.3 \times (1 + 3)] = 0.46 \text{ ft}^3$$

Step 9—The volume of fly ash, V_F , is:

$$V_F = 0.45 \times 3 = 1.38 \text{ ft}^3$$

Step 10—The bulk density of each material is (specific gravity $\times$ 62.4):

cement	= 196.6 lb/ft ³
fly ash	= 143.5 lb/ft ³
No. 4 to 3/4 in.	= 169.1 lb/ft ³
3/4 to 1-1/2 in.	= 170.4 lb/ft ³
1-1/2 to 3 in.	= 170.4 lb/ft ³
fine aggregate	= 167.9 lb/ft ³
water	= 62.4 lb/ft ³

Then the mass of each material (saturated-surface dry basis) required for 1 yd³ of concrete is (volume in proportions $\times$ bulk density):

cement	= 88.5 lb
fly ash	= 198.1 lb
No. 4 to 3/4 in.	= 916.5 lb
3/4 to 1-1/2 in.	= 705.3 lb
1-1/2 to 3 in.	= 1085.1 lb
fine aggregate	= 1106.2 lb
water	= 147.9 lb

Steps 11 and 12 remain the same as before.

A3.7—Proportioning using soil compaction concepts

A3.7.1 General—This proportioning method involves establishing a relationship between the dry density and moisture content of the RCC by compacting specimens at a given compactive effort over a range of moisture content. It is similar to the method used to determine the relationship between the moisture content and dry density of soils and soil-aggregate mixtures. The compaction equipment used includes a 4.54 kg (10 lb) compaction hammer having an 457 mm (18 in.) drop and a 152 mm (6.0 in.) diameter steel mold having a height of 116 mm (4.6 in.). Both are described in ASTM D 1557. The method is suited to those mixtures that have a NMSA of 19 mm (3/4 in.) or less and cementitious material contents greater than typically used in RCC mixtures for massive sections. It should generally be considered for use in proportioning RCC mixtures for relatively thin section such as pavements or slabs. The compactive effort to be applied to the moisture-density specimens corresponds to that described in ASTM D 1557.

A3.7.2 Cementitious materials content—The cementitious materials content is determined by the compressive or flexural strength at the optimum water content for different mixtures. The cementitious material content is expressed as a percentage of the dry mass of aggregate. The cementitious material content for RCC pavements generally ranges from 10 to 17%, depending on the strength and durability requirements. This range corresponds to approximately 210 to 360 kg/m³ or 350 to 610 lb/ft³ of cementitious material.

A3.7.3 Fine and coarse aggregate content—Fine and coarse aggregate should be blended to create a dense-graded combined aggregate. Recommended grading limits for 19 mm

Table A3.2—Recommended RCC pavement combined aggregate grading limits

Sieve size	Cumulative percent passing
25 mm (1 in.)	100
19 mm (3/4 in.)	82 to 100
12.5 mm (1/2 in.)	72 to 93
9.5 mm (3/8 in.)	66 to 85
4.75 mm (No. 4)	51 to 69
2.36 mm (No. 8)	38 to 56
1.18 mm (No. 16)	28 to 46
600 μ m (No. 30)	18 to 36
300 μ m (No. 50)	11 to 27
150 μ m (No. 100)	6 to 18
75 μ m (No. 200)	2 to 8

(3/4 in.) NMSA to be used in RCC pavement mixtures are given in Table A3.2. The volume of fine and coarse aggregate per unit volume of concrete are determined after the optimum water content of the aggregate-cementitious material mixture is determined.

A3.7.4 Water content—For a given compactive effort, the optimum moisture content of the mixture is depends upon the properties of the aggregates used and the cementitious material content. Strength loss will occur with a moisture content below the optimum. This is due to insufficient paste and the presence of voids between aggregate particles. Strength loss will also occur if the moisture content is significantly above the optimum due to an increase in the w/cm . The moisture content (by mass) is expressed as a percent of the dry mass of the aggregate-cementitious material mixture and should be determined in accordance with ASTM C 566. After completion of compaction tests conducted at incremental moisture contents, the moisture-density data points are plotted, and a smooth curve is drawn through them. The peak of the parabolic curve establishes the optimum moisture content (Fig. 3.3).

A3.7.5 Proportioning steps—

Step 1—Combine dry coarse and fine aggregate to produce a grading within the limits of Table A3.2. Approximately 9 kg (20 lb) of the combined aggregate are needed for each moisture-density test.

Step 2—Select a cementitious materials content according to the compressive or flexural strength. For RCC pavements having specified flexural strengths as determined in accordance with ASTM C 78, of 4 to 5 MPa or 600 to 700 psi, the amount of cementitious materials used should range between 12 and 16% by mass of dry aggregate. The value selected will depend partially on the type and amount of pozzolan used.

Step 3—Using the combined aggregate and the selected cementitious materials content, determine the optimum moisture content of the RCC in accordance with ASTM D 1557. A minimum of four moisture-density specimens should be molded, and each specimen should be prepared from a separate batch of RCC to avoid excessive cement hydration. Each successive batch should contain a higher moisture content than previous ones. This is done by adding

sufficient water to the batch so as to increase the RCC moisture content, as a percentage of the dry mass of RCC by 0.75 to 1.0%.

Step 4—Determine the optimum moisture content by plotting the dry mass of each specimen versus its respective moisture content and drawing a smooth curve through these plotted points (Fig. A3.3). The moisture content and dry density corresponding to the peak of this curve is the optimum moisture.

Step 5—Assume an entrapped air content of 2.0%. (The actual value can be calculated from compaction test results and the zero air-voids curve.)

Step 6—Using the optimum moisture content, the selected cementitious materials content, and the value for the air content, calculate the absolute volumes and masses of the materials for the required unit volume of concrete.

Step 7—Follow Steps 2 through 6 using a higher and lower cementitious materials content. After trial batches are produced at the optimum moisture content for each cementitious materials content, plot strength versus cementitious materials content to determine the value needed for the final mixture proportions. Follow Steps 2 through 6 again with the selected cementitious materials content to determine the optimum moisture content and recalculate the material absolute volumes and mass.

A3.7.6 Example problem—Concrete pavement is required for a large storage terminal located in a moderate climate. The specified flexural strength is 4.5 MPa (650 psi) at 28 days age. Local aggregate sources are capable of producing ample supplies of aggregate fractions which, when properly blended, will be well-graded. A nominal maximum-size aggregate of 19 mm (3/4 in.) is selected based on the type of modified paving equipment that is anticipated for use. Type I portland cement and Class F fly ash are available and will be specified. Proportion an RCC mixture which may be compacted such that it contains not more than 2% voids and will achieve the required strength.

Step 1—Aggregates for the project are supplied in two size groups—4.75 to 19 mm (No. 4 to 3/4 in.) and 75 μ m to 4.75 mm (No. 200 to No. 4). Sieve analysis tests indicate that if 46% of the coarse aggregate is combined with 54% of the fine aggregate, a well-graded combined aggregate grading within the limits of Table A3.2 is produced. Four 9 kg or 20 lb batches of the combined dry aggregate are batched in preparation for the production of compaction test specimens.

Step 2—A cementitious materials content of 14% by dry mass of aggregates is initially selected for use. A fly ash content of 25% by absolute volume of cementitious materials is also selected. Varying cementitious materials contents and fly ash contents should be considered, depending on specification requirements during the mixture proportioning study.

Steps 3 and 4—Compaction tests are conducted in accordance with ASTM D 1557, Method D, at regularly spaced RCC moisture contents. The moisture-dry density curve indicates the optimum moisture content is 5.8% and the maximum dry density of 2348 kg/m³ or 146.5 lb/ft³.

Steps 5 and 6—The bulk densities (dry basis) of the materials are:

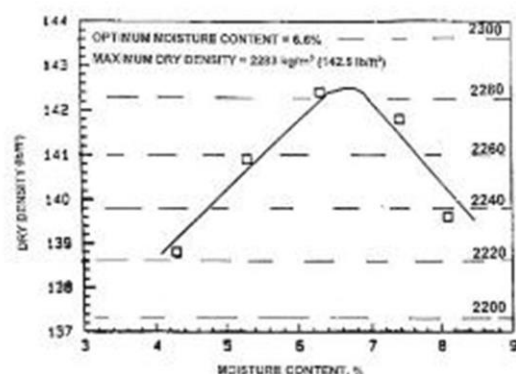


Fig. A3.3—Typical moisture-dry density relationship.

cement	=	3150 kg/m ³ (197 lb/ft ³)
fly ash	=	2450 kg/m ³ (153 lb/ft ³)
4.75 to 19 mm		
(No. 4 to 3/4 in.)	=	2716 kg/m ³ (169.5 lb/ft ³)
75 μ m to 4.75 mm		
No. 200 to No. 4)	=	2624 kg/m ³ (163.7 lb/ft ³)
water	=	1000 kg/m ³ (62 lb/ft ³)

Calculations are given herein for SI units and the corresponding inch-pound values are in the framed text. The proportions of materials (dry basis) used in a batch prepared at the optimum moisture content are (in SI units):

75 μ m to 4.75 mm =	9 kg $\times$ 0.54	= 4.86 kg (0.00185 m ³)
4.75 to 19 mm =	9 kg $\times$ 0.46	= 4.14 kg (0.00152 m ³)
cementitious material volume =	(9 kg $\times$ 0.14) / 3150	= 0.0004 m ³
cement =	(0.0004 m ³ $\times$ 0.75) $\times$ 3150 kg/m ³	= 0.945 kg (0.0003 m ³)
fly ash =	(0.0004 m ³ $\times$ 0.25) $\times$ 2450 kg/m ³	= 0.245 kg (0.0001 m ³)
water =	9 kg $\times$ 0.058	= 0.522 kg (0.000522 m ³)
total air-free batch volume		= 0.004292 m ³

For 1 m³ of concrete, multiply the volume of each material by:

(1 - 0.02) / 0.004292	=	228.33
75 μ m to 4.75 mm	=	0.422 m ³ (1110 kg)
4.75 to 19 mm	=	0.347 m ³ (945 kg)
cement	=	0.069 m ³ (216 kg)
fly ash	=	0.023 m ³ (56 kg)
water	=	0.119 m ³ (119 kg)
air	=	0.02 m ³

The proportions of materials (dry basis) used in a batch prepared at the optimum moisture content are (in inch-pound units):

No. 200 to No. 4	=	20 lb × 0.54	=	10.80 lb (0.0660 ft ³)
No. 4 to 3/4-in.	=	20 lb × 0.46	=	9.20 lb (0.0543 ft ³)
cementitious material volume	=	(20 lb × 0.14)/196.56	=	0.01425 ft ³
cement	=	(0.01425 ft ³ × 0.75) × 196.56 lb/ft ³	=	2.10 lb (0.01069 ft ³)
fly ash	=	(0.01425 ft ³ × 0.25) × 152.88 lb/ft ³	=	0.54 lb (0.00356 ft ³)
water	=	20 lb × 0.058	=	1.16 lb (0.0186 ft ³)
total air-free batch volume	=		=	0.1532 ft ³

For 1 yd³ of concrete, multiply the volume of each material by
 $(27 - 0.54)/0.1532 = 172.72$

No. 200 to No. 4 (dry)	=	11.40 ft ³ (1866.3 lb)
No. 4 to 3/4-in. (dry)	=	9.38 ft ³ (1589.7 lb)
cement	=	1.85 ft ³ (363.6 lb)
fly ash	=	0.61 ft ³ (93.3 lb)
water	=	3.21 ft ³ (200.3 lb)
air	=	0.54 ft ³

Step 7—Follow Steps 2 through 6 using a higher and lower cementitious materials content. After trial batches are produced and flexural strength specimens molded and tested at the optimum moisture content for each cementitious materials content, plot flexural strength versus cementitious materials content to determine the value needed for the final mixture proportions. Follow Steps 2 through 6 again with the selected cementitious materials content to determine the optimum moisture content and recalculate the material absolute volumes and weights masses.

APPENDIX 4—CONCRETE ROOF TILE MIXTURE PROPORTIONING

A4.1 — General

Concrete roof tiles are generally produced by an extrusion process, although some manufacturers incorporate a vibration and compaction process similar to that for producing masonry units and paving stones. The extrusion process requires a mixture incorporating only fine aggregate, whereas the vibration and compaction process incorporates both fine and coarse aggregates. This guide deals only with the manufacture of concrete roof tiles by the extrusion process.

Roof tiles are produced by extruding a concrete mixture into a specific shape (profile) and cutting the extruded section to the proper length. The freshly extruded roof tiles are transported by conveyor to storage racks and subsequently placed into kilns for air, mist, or low-pressure steam curing. The proportioning of

materials for the concrete mixture will vary depending on the type of materials, the specific tile profile being produced, and the desired density.

Material properties most critical for concrete roof tiles are strength, absorption, durability, density, texture, and aesthetics. The strength of roof tiles is determined by measuring the flexural load capacity.

A low-absorption value of concrete roof tiles is a major factor in the design of a roof-framing system due to the effect of increased dead load under inclement weather conditions. Low-absorption values are also thought to improve the durability aspects of roof tiles; however, further studies on this subject are warranted.

The density of roof tiles determines the load per unit area that a structure must support. This can influence the feasibility of using concrete roof tile instead of asphaltic shingles for a proposed reroofing operation.

Texture and aesthetics are important for providing the purchaser with an architecturally desirable product that can be manufactured to match pigmented stucco walls or other building elements.

A4.2 — Selection of materials

A4.2.1 Portland cement—Type I and Type III portland cement (ASTM C 150) are typically used in the production of concrete roof tile depending upon the climate, availability, and production schedule for the particular manufacturing facility.

A4.2.2 Mineral admixtures—Pozzolans are sometimes used as partial replacement of portland cement. Typically, either Class F or Class C fly ash (ASTM C 618) is used. Class C fly ash is often used because it provides faster strength gain than Class F. Class C fly ash can be used as a partial replacement for cement in the range of 20 to 25%. The cement replacement percentage should be determined so that sufficient early strength is obtained for production and handling.

A4.2.3 Normalweight and lightweight aggregates—Most roof tiles are produced using only normalweight aggregates; however, some production incorporates lightweight aggregate. Lightweight roof tiles are produced mainly for the reroofing market where structures are not designed for normalweight roof tile dead loads. Considering that patents for lightweight roof tile production are held by certain manufacturing companies, this guide deals exclusively with the manufacture of roof tiles using normalweight aggregates.

A4.2.4 Grading and fineness modulus—Fine aggregate only is used in the production of extruded concrete roof tile to facilitate cutting of the extrudate and producing smooth ends. The fineness modulus of the aggregate should range between 2.2 and 3.0, with a typical value being 2.5. The grading limits that have been recommended by one international supplier to the roof tile industry are shown in Fig. A4.1.

A4.2.5 Admixtures—

Accelerators—Depending on the climate, production schedule, and type of cement, accelerating admixtures are used in the production of roof tiles.

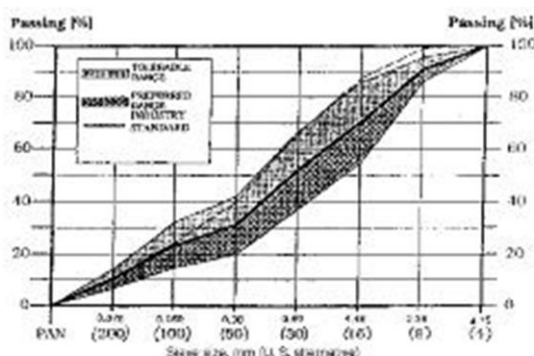


Fig. A4.1—Aggregate grading ranges for concrete roof tiles.

Water repellents—Integral water repellents can be used to decrease water absorption of roof tile. Use of low w/cm , pozzolans and low-absorption aggregates typically decrease water absorption as well.

Plasticizers (wetting agents, water reducers)—Plasticizers can be used to increase the flow of material while improving the texture of the roof tile during extrusion and cutting.

A4.2.6 Pigments—Pigments are added integrally to the concrete mixture, or placed in a cement slurry, or both, and applied to the roof tile after extrusion. This is done to obtain the desired aesthetics with the roof tile, either by producing a single color or applying a mottled color to the exposed surface for a specific effect.

A4.3—Proportioning procedure

A4.3.1 Water-cementitious materials ratio—The w/cm can range from 0.32 to 0.45 depending on the fineness of the aggregate and the profile of the roof tile being produced. When the amount of cementitious materials is held constant, the w/cm will increase with decreasing aggregate fineness modulus (due to increased surface area), but it may not be clear how the type of roof tile profile being produced influences the w/cm .

For a given concrete roof tile mixture, the flexural load capacity of a convoluted roof tile will be greater than that of a flat roof tile due to a greater moment of inertia for the convoluted tile. Therefore, to achieve the same flexural load capacity, the concrete mixture for flat roof tile must be stronger than the mixture for convoluted roof tile. This is accomplished by increasing the cement content of the mixture, which in turn, decreases the water-cementitious materials content.

Cement-aggregate ratio by weight mass—The cement to aggregate ratio varies from 1:2.5 to 1:4.5, with a typical cement to aggregate ratio for flat and convoluted roof tile being 1:3 and 1:4, respectively.

Example 1—An example of a convoluted roof tile mixture using Type III portland cement and no admixtures is:

- 1200 kg (2600 lb) sand (FM = 2.60, SSD)
- 285 kg (620 lb) cement (cement-aggregate ratio = 1:4.2)
- 123 kg (267 lb) water (w/c = 0.43)
- 10 kg (22 lb) pigment (3.5% by mass of cement)

Example 2—An example of a flat roof tile mixture using Type III portland cement and no admixtures is:

- 1200 kg (2600 lb) sand (FM = 2.60, SSD)
- 387 kg (840 lb) cement (cement-aggregate ratio = 1:3.1)
- 123 kg (267 lb) water (w/c = 0.32)
- 13 kg (29 lb) pigment (3.5% by mass of cement)

APPENDIX 5—CONCRETE MASONRY UNIT MIXTURE PROPORTIONING

A5.1—General

This guide contains methods for selecting mixture proportions for standard CMU (less than no-slump mixtures) manufactured on conventional vibrating block machines. Covered are the selection of cementitious materials, blending and proportioning aggregates for both normalweight and lightweight units, and curing conditions as they affect mixture proportioning. Mixture proportioning for decorative CMU is not covered due to its highly specialized nature.

A5.2—Cementitious materials

A5.2.1 Portland cement—Portland cement should conform to ASTM C 150. In certain areas, block cement is used, but this type of cement does not have a corresponding ASTM specification. This is a proprietary product and its performance characteristics should be discussed with the cement supplier. Types III and III-A portland cements are frequently used to achieve early strengths and to facilitate handling and storage.

A5.2.2 Supplementary cementitious materials—commonly used supplementary cementitious materials are ground granulated blast-furnace slag (GGBFS), fly ash (ASTM C 618, Class F and C) and silica fume. Common additions by mass of cement for GGBFS are 20 to 50%. Fly ash is normally used at a rate of 15 to 25% by mass of cement.

A5.2.3 Quantity of cementitious materials—Cementitious materials content of CMU mixtures can be expressed as kilograms (kg) or pounds (lb) of material per batch or per CMU (200 mm [8 in.] standard unit). Also, cement content can be calculated as a percent of the total mass of the aggregates. Cement content can vary depending on design strength, aggregate grading and quality, and expected curing condition. For ASTM C 90, CMU produced with normal-weight aggregates, a cement content of 7 to 10% by mass of aggregate is the normal range. Obviously, higher cement factors are needed for high-strength CMU and these may exceed 20% by mass of aggregates.⁹

A5.3—Aggregates

Aggregates for CMU may be made from either normal-weight or lightweight materials. The normalweight materials are generally considered to be gravel, crushed limestone, and unprocessed blast-furnace slag. Normalweight aggregates should conform to the requirements of ASTM C 33.

Lightweight aggregates may be classified into three general types as follows:

- Aggregates prepared by expanding, pelletizing, or sintering products such as blast-furnace slag, clay, diatomite, fly ash, shale, or slate;
- Aggregates prepared by processing natural materials, such as pumice, scoria, or tuff; or

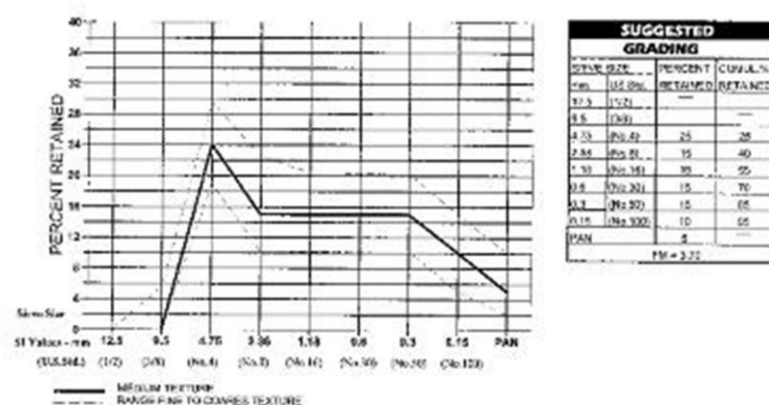


Fig. A5.1—Aggregate analysis graph: normal weight.

Table A5.1—Fineness modulus (FM) by mass and volume

Sieve size, mm or U.S. alternative	Percent retained by mass	Cumulative percent retained by mass	Specific gravity (SSD)	Percent retained by volume	Cumulative percent retained by volume
9.5 (3/8 in.)	0	0	—	—	—
4.75 (No. 4)	5	5	1.5	5.9	5.9
2.36 (No. 8)	25	30	1.6	27.8	33.7
1.18 (No. 16)	25	55	1.7	26.1	59.8
0.60 (No. 30)	10	65	1.8	9.9	69.7
0.30 (No. 60)	10	75	1.9	9.3	79.0
0.15 (No. 100)	10	85	2.0	8.9	87.9
Pan/FM	15	FM by mass	2.2	12.1	FM by volume
	Total 100	3.15	—	Total 100	3.36

- Aggregate consisting of end products of coal or coke combustion.

Lightweight aggregates should conform to ASTM C 331.

Grading of aggregates—Generally, in CMU manufacture, material passing the 9.5 mm (3/8 in.) sieve and remaining on the 4.75 mm (No. 4) sieve is designated as coarse aggregate. A coarser grading of normalweight aggregate results in less surface area and less inter-particle voids; therefore, less cement paste is needed. If the volume of cementitious materials is held constant, a lower w/cm can be used resulting in increased strength. Therefore, the ideally graded aggregate is that mixture that contains as much coarse material as can be used, short of producing harshness in the mixture and an excessively rough-textured CMU.

Fine aggregates consist of natural sand, lightweight fines or stone screenings, which pass the 4.75 mm (No. 4) sieve. The grading of each aggregate to be used in the mixture should be determined in accordance with ASTM C 136.

Fineness modulus—The specific gravity for natural aggregates is essentially constant for all sieve sizes and, as a result, the fineness modulus on a mass basis will directly reflect the volumes occupied by each particular size. In contrast, the specific gravities measured on each sieve size in a typical commercial lightweight aggregate blend reveal a progressive increase in specific gravity as the particle size decreases. It is the volume occupied by each size fraction, not the mass

of material retained on each sieve, that ultimately determines the void structure, paste requirements, and workability characteristics. An example is included and shown in Table A5.1 to further demonstrate this difference between the mass and volume occupied by particles on each sieve for a particular lightweight aggregate.

From Table A5.1 it can be seen that the fineness modulus by volume of 3.36 indicates a considerably coarser gradation than the fineness modulus by mass, 3.15. Therefore, because of their unique characteristics, lightweight aggregates require a significantly larger percentage of material retained on the finer sieves, when computed on a mass basis, than normalweight aggregates to provide a comparable void system. Furthermore, pyroprocessed lightweight aggregate particles passing the 150 μ m (No. 100) sieve are extremely beneficial because they serve a dual role as both aggregate and pozzolan.

It is important to recognize that the fineness modulus is a single number index that suggests an average particle size, and identical fineness moduli may be obtained from fundamentally differing gradings. The fineness modulus can be useful as an overall qualitative index or for quality control of an individual supplier providing a specific standard gradation, but it is not a reliable index for comparing alternative aggregate sources. From the data shown in Table A5.2, it can be seen that an aggregate producer could supply three different grading textures that have identical fineness modulus that would

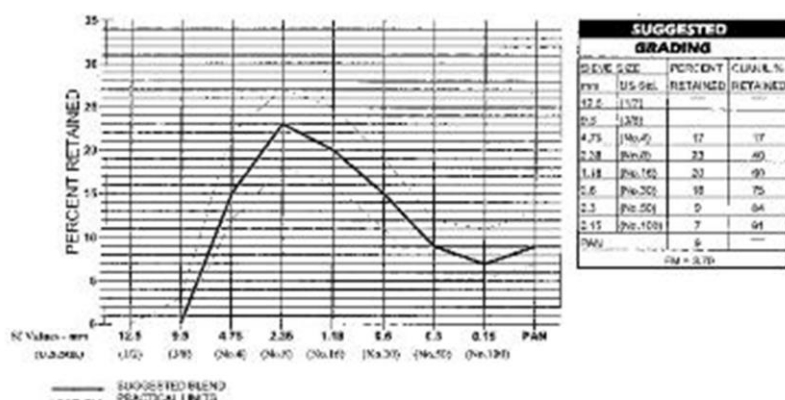


Fig. A5.2—Aggregate analysis graph: fine texture intermediate weight.

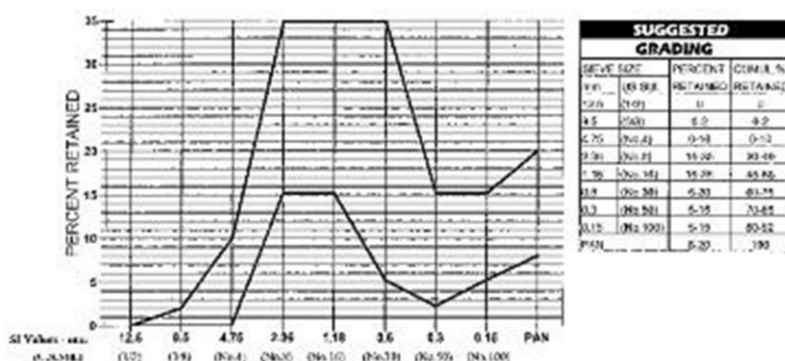


Fig. A5.3—Aggregate analysis graph: lightweight.

Table A5.2—Comparison of gradings for aggregates with equal fineness modulus

Sieve size, mm or U.S. alternative	ASTM C 331 limits for combined aggregates, % retained	Texture			ASTM C 331 limits for combined aggregates, % retained
		Fine	Medium	Coarse	
9.5 (3/8 in.)	(0)	0	0	0	(0-10)
4.75 (No. 40)	(0-15)	5	10	15	(10-35)
2.36 (No. 8)	—	35	40	45	(35-65)
1.18 (No. 16)	(20-60)	55	55	55	—
0.60 (No. 30)	—	75	70	65	—
0.30 (No. 60)	(65-90)	85	80	75	(75-90)
0.15 (No. 100)	(75-95)	90	90	90	(85-95)
FM	—	3.45	3.45	3.45	—

produce CMUs with three significantly different textures. Because fineness modulus methodology reflects an average particle size, by keeping the percent retained constant on the 1.18 mm (No. 16) sieve for all gradings, one can manipulate numbers and arrive at the same fineness modulus for all three fundamentally different products that satisfy the grading limits in ASTM C 331.

Figure A5.1 illustrates the ideal grading and range for a blend of normalweight aggregates. A blend of intermediate-weight

aggregate shown in Fig. A5.2 and A5.3 illustrates the ideal grading for 100% lightweight CMU. Although the curves are empirical, they can be modified to fit local market preferences for surface texture. The optimum fineness modulus for normalweight aggregates is generally considered to be 3.70.

Menzel⁸ showed that the influence of grading (expressed in terms of fineness modulus) on the strength-making characteristics of CMU molded with structural grade lightweight

aggregate (LWA CMU) differed from units incorporating rounded sand and gravel. The compressive strength of the CMUs made with expanded shales was essentially constant over a wide range of fineness modulus up to approximately 3.5, after which there was a rapid decline in strength levels with coarser gradings. This behavior was opposite to the sand and gravel CMUs, which showed an increase of strength, ultimately reaching a maximum at a fineness modulus above 4. Compressive strength levels for LWA CMUs significantly greater than ASTM C 90 minimums are best achieved when finer gradings of structural grade lightweight aggregate are used. Systematically eliminating large particles that have an inherently higher porosity, and as a consequence a lower particle strength, will significantly increase the strength. Lowering of the nominal maximum size of aggregate also reduces bridging of particles within the mass and improves the compactability of the mixture.

Use of optimized gradings will result in a balance of qualities that include production characteristics (smooth feeding, compactability, green strength) as well as superior hardened concrete properties. What is truly important in achieving the consistent quality standards required of high-quality LWA CMUs is close attention to specific individual sieve sizes of aggregate, and in particular, the material retained on the 4.75 and 2.36 mm (No. 4 and No. 8) sieves (essential for texture control) and that passing the 150 μ m (No. 100) (critical for molding and handling characteristics). Following the gradings recommendations shown in Fig. A5.3 will result in a uniform, fine-textured surface with an optimum interstitial void system within the block concrete. This will, in turn, maximize the thermal, acoustical, and fire resistance as well as the strength-making properties of the finished product.

A5.4—Proportioning procedure

Calculation of aggregate proportions—The percentage of coarse and fine aggregate by volume to achieve an optimum fineness modulus grading is calculated as follows

$$FA\% = \frac{FM_{CA} - FM_{COMB}}{(FM_{CA} - FM_{FA}) \times 100} \quad (A5.1)$$

where FM_{CA} and FM_{FA} are the fineness modulus of coarse and fine aggregate, respectively; and FM_{COMB} is the recommended combined fineness modulus.

Example—

Given: $FM_{CA} = 5.48$; $FM_{FA} = 2.57$

Desired combined $FM_{COMB} = 3.70$

$$FA\% = \frac{5.48 - 3.70}{(5.48 - 2.57) \times 100} = 61\% \quad (A5.2)$$

Therefore, the blend would consist of 39% coarse aggregate and 61% fine aggregate, by volume.

NOTE: Fineness modulus determinations are normally based on mass retained on given sieve sizes rather than volumes. Volume-based gradings can be developed for use in designing block mixtures; however, experience has shown

that mass-determined fineness moduli provide a satisfactory basis for preliminary block mixtures because production adjustments are almost always needed. Block machine compaction and vibration will affect the surface texture of the masonry units as will the moisture content of the mixture at time of use.

Calculation of batch quantities—To determine batch quantities, the volume capacity of the mixer to be used and the dry mass of the aggregates must be determined. For design purposes, the full-rated volume of the mixer is used, yet, total batch size may need adjusting as trial batches are run.

Trial batch example:

Mixer volume = 2.27 m³ (80 ft³)

CA density (dry-rodded) = 1218 kg/m³ (76 lb/ft³)

FA density (dry-rodded) = 1522 kg/m³ (95 lb/ft³)

The paste volume is only a little greater than the voids between the aggregate particles so that the dry-rodded volume is close to the concrete volume. A batch volume of 2.21 m³ or 78 ft³ will be used.

Mass calculations in SI units:

Mass of CA = 2.21 m³(0.39)1218 kg/m³ = 1050 kg

Mass of FA = 2.21 m³(0.61)1522 kg/m³ = 2052 kg

Total mass of aggregate = 3102 kg

Cement factor: assume 10% by mass of aggregate

Cement content = 3102(0.10) = 310 kg

Mass calculated in inch-pound units:

Mass of CA = 78 ft³(0.39)(76 lb/ft³) = 2312 lb

Mass of FA = 78 ft³(0.61)(95 lb/ft³) = 4520 lb

Total mass of aggregate = 6832 lb

Cement factor: assume 10% by mass of aggregate

Cement content = 6832(0.10) = 683 lb

The water content is adjusted until the mixture will "ball" in the hand. It will have sufficient cohesion to hold its shape when squeezed but will not exhibit any free moisture.

This method is more of a trial-and-error approach than the volumetric approach and therefore, is for trial designs only. Test batches must be run through the machine to be used in production to verify such characteristics as compressive strength, surface texture, absorption, and green strength (the ability of a freshly molded block to withstand machinery and pallet movement without cracking).

APPENDIX 6—PERVIOUS CONCRETE MIXTURE PROPORTIONING

A6.1—General

This guide provides a method for proportioning no-slump pervious concrete that is used for pavements and other applications where drainage and percolation are needed. Pervious concrete is an open-graded material that is bound by cement paste. The structure of the material allows the passage of water, yet provides moderate structural strength. Because of the high percentage of voids, pervious concrete has been used also as an insulating material.

A6.2—Materials

Pervious concrete is composed of cement or a combination of cement and pozzolan, coarse aggregate, and water. Occasionally, a small amount of fine aggregate has been

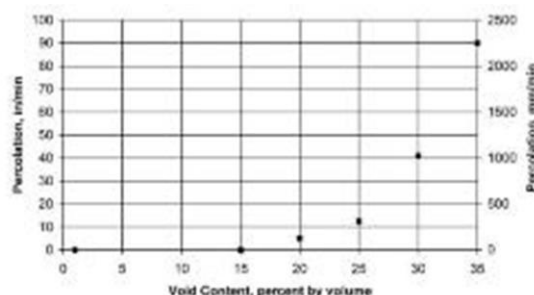


Fig. A6.1—Minimum void content for percolation based on NAA-NRMCA tests and test method.

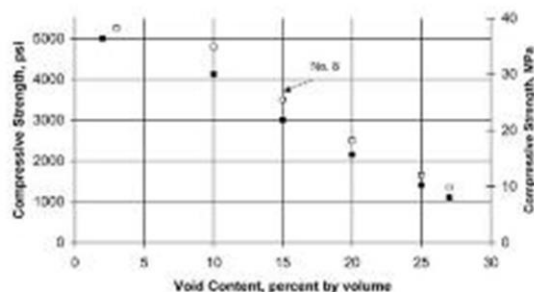


Fig. A6.2—Relationship between void content and 28-day compressive strength for No. 67 and No. 8 aggregate size.

incorporated to increase compressive strength and to reduce percolation through the concrete. The most common gradings of coarse aggregate used in pervious concrete meet the requirements of ASTM C 33 sieve sizes 9.5 to 2.36 mm (size number 8), 12.5 to 4.75 mm (size number 7), and 19.0 to 4.75 mm (size number 67). Portland cement should conform to ASTM C 150 or a combination of cementitious materials can be used that conform to the appropriate ASTM specifications.

A6.3—Water-cementitious materials ratio

The w/cm is an important consideration for maintaining strength and the void structure of the concrete. A high w/cm reduces the adhesion of the paste to the aggregate and causes the paste to flow and fill the voids even when lightly compacted. A low w/cm will tend to cause balling in the mixer and prevent an even distribution of materials. Experience has shown a range of 0.35 to 0.45 will provide the best aggregate coating and paste stability. Higher values of w/cm should only be used if the concrete is lightly tamped or compacted. The w/cm versus compressive strength relationship, which is normally used with conventional concrete, does not apply to pervious concrete.

A6.4—Durability

Freezing-and-thawing tests of pervious concrete indicate poor durability if the void system is filled with water. Tests have indicated that durability is improved when the void structure is permitted to drain and the cement paste is

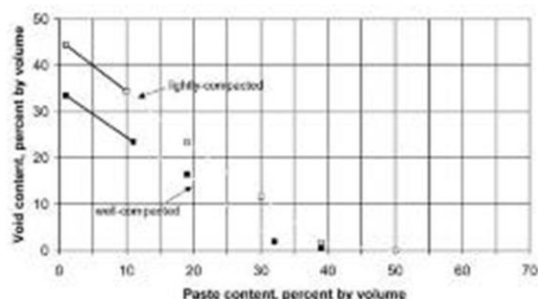


Fig. A6.3—Relationship between paste and void content for No. 8 aggregate size designations.

Table A6.1—Effective b/b_o values

Percent fine aggregates	b/b_o	
	ASTM C 33 Size No. 8	ASTM C 33 Size No. 67
0	0.99	0.99
10	0.93	0.93
20	0.85	0.86

air-entrained. No research has been conducted on resistance of pervious concrete to the aggressive attack by sulfate-bearing or acidic water that can percolate through the concrete. Therefore, caution should be used in applications where aggressive water may exist.

A6.5—Percent voids

Compressive strength versus percolation—To ensure that water will percolate through pervious concrete, the percent voids, calculated as percent air by the gravimetric method (ASTM C 138), should be 15% or greater as shown on Fig. A6.1.⁶ At this void content, the compressive strength of the concrete as shown in Fig. A6.2 would be approximately 24 MPa (3500 psi) at 28 days. The higher the percent voids, the higher the percolation rate and the lower the compressive strength. The lower the percent voids, the lower the percolation rate and the higher the compressive strength. Also, the compressive strength increases as the nominal maximum size aggregate decreases.

A6.6—Amount of coarse aggregate

Coarse aggregate, b/b_o dry-rodded density tests made by the National Aggregates Association-National Ready Mixed Concrete Association (NAA-NRMCA)⁶ show that the dry-rodded density of coarse aggregate, as determined by ASTM C 29/C 29M, can be effectively used in proportioning pervious concrete, where:

- b/b_o = dry-rodded volume of coarse aggregate in a unit volume of concrete;
 b = solid volume of coarse aggregate in a unit volume of concrete; and
 b_o = solid volume of coarse aggregate in a unit volume of coarse aggregate.

The b/b_o value automatically compensates for the effects of different coarse aggregate particle shape, grading, and specific gravity. Furthermore, the b/b_o values for a range of nominal maximum-size aggregates normally used in pervious concrete, 10 to 20 mm (3/8 to 3/4 in.), are very similar. Table A6.1 gives the b/b_o values for coarse aggregate sizes No. 8 and No. 67 for fine aggregate contents of 0, 10, and 20% of the total aggregate.

A6.7—Proportioning procedure

The proportioning procedure for pervious concrete is based on the volume of paste necessary to bind the aggregate particles together while maintaining the necessary void content, as shown in Fig. A6.3. The quantity of aggregate depends on the dry-rodded density and the b/b_o values selected from Table A6.1. Once the paste volume is determined from Fig. A6.3 and the desired w/cm is selected, the cement and water quantities can be determined from the relationship:

$$\text{Paste volume } (V_p) = \text{cement volume} + \text{water volume, or}$$

$$V_p = c/3150 + w/1000 \text{ (m}^3\text{)}$$

In inch-pound units

$$V_p = c/(3.15 \times 62.4) + w/62.4 \text{ (ft}^3\text{)}$$

where c is the mass of cement and w is the mass of water. If the water-cement ratio is (w/c) then

$$w = (w/c)c; \text{ and}$$

$$V_p = c/3150 + [(w/c)c/1000] \text{ (m}^3\text{)}$$

In inch-pound units

$$V_p = c/(3.15 \times 62.4) + [(w/c)c/62.4] \text{ (ft}^3\text{)}$$

Therefore, once the paste volume is determined from Fig. A6.3 and the w/cm is selected, the mass of cement can be calculated. When fine aggregate is used, the paste volume should be reduced by 2% for each 10% fine aggregate of the total aggregate for well-compacted pervious concrete, and by 1% for each 10% fine aggregate of the total aggregate for lightly compacted pervious concrete. These reductions are necessary to maintain the same percent voids by volume.

Example—Proportion a well-compacted pervious concrete mixture with a No. 8 coarse aggregate (ASTM C 33) that has a dry-rodded density of 1742 kg/m³ (108.7 lb/ft³), a bulk specific gravity (saturated surface dry) of 2.75, and an absorption of 1.2%. The mixture should have a void content of at least 20% and a compressive strength of 14 MPa or 2000 psi at 28 days. The pervious concrete will be proportioned for $w/c = 0.38$, which has been selected as a stable paste for this example. No fine aggregate will be used in the mixture.

Mass of aggregate (M_a) per m³ (yd³):

$$M_a = 1742 \times 0.99 = 1725 \text{ kg (dry)}$$

$$= 1725 \times 1.012 = 1746 \text{ kg (SSD)}$$

$$M_a = 108.7 \times 0.99 \times 27 = 2906 \text{ lb (dry)}$$

$$= 2906 \times 1.012 = 2941 \text{ lb (SSD)}$$

Solid volume of aggregate per m³ (yd³) (V_a):

$$V_a = 1746 / 2750 = 0.635 \text{ m}^3$$

$$V_a = 2941 / (2.75 \times 62.4) = 17.14 \text{ ft}^3$$

From Fig. A6.3, the percent paste by volume is 16.5 when the voids equal 20% and the material is well-compacted.

Figure A6.1 indicates a percolation rate of approximately 125 mm/min (5 in./min). Figure A6.2 indicates a compressive strength of approximately 17 MPa (2500 psi).

Solid volume of paste per m³ (V_p):

$$V_p = 16.5/100 = 0.165 \text{ m}^3, \text{ and}$$

$$0.165 = c/3150 + (0.38)c/1000, \text{ therefore;}$$

$$c = 237 \text{ kg/m}^3$$

$$w = 237(0.38) = 90 \text{ kg/m}^3$$

$$V_c = 237/3150 = 0.075 \text{ m}^3$$

$$V_w = 90/1000 = 0.090 \text{ m}^3$$

In inch-pound units

$$V_p = (16.5/100) \times 27 = 4.46 \text{ ft}^3, \text{ and}$$

$$4.46 = c/(3.15 \times 62.4) + 0.38(c/62.4) = 2.03 + 2.42, \text{ there-}$$

fore;

$$c = 399 \text{ lb/yd}^3$$

$$V_c = 399/(3.15 \times 62.4) = 2.03 \text{ ft}^3$$

$$w = (0.38)399 = 152 \text{ lb}$$

$$V_w = 152/62.4 = 2.43 \text{ ft}^3$$

The batch quantities, per m³, are as follows:

Cement	237 kg/m ³
Water	90 kg/m ³
No. 8 aggregate	1745 kg/m ³ (SSD)
Total mass	2072 kg/m ³
Density	2072 kg/m ³

Check solid volume, per m³:

Cement	0.075 m ³
Water	0.090 m ³
No. 8 aggregate	0.635 m ³
Total	0.800 m ³

$$\text{Volume of voids} = 1.000 - 0.800 = 0.200 \text{ m}^3$$

The batch quantities, per yd³, are as follows:

Cement	399 lb/yd ³
Water	152 lb/yd ³
No. 8 aggregate	2941 lb/yd ³ (SSD)
Total mass	3492 lb/yd ³
Density	129.3 lb/yd ³

Check solid volume, per lb/yd³:

Cement	2.03 ft ³
Water	2.43 ft ³
No. 8 aggregate	17.14 ft ³
Total	21.60 ft ³

$$\text{Volume of voids} = (27 - 21.60) = 5.4 \text{ ft}^3$$

$$\text{Percent voids} = 20.00$$

The calculated mixture proportions should be checked in the laboratory by trial batch and adjusted as required. In addition, it is recommended that trial batches include two additional mixtures with 30 kg/m³ (50 lb/yd³) more and 30 kg/m³ (50 lb/yd³) less cement. These mixtures should also include the appropriate adjustments in: 1) water to produce the required w/cm ; and in 2) aggregate to maintain the required percent voids. Generally, achieving the required void content and percolation rate with a stable paste are of greater importance than compressive strength of the mixture.

ANEXO VI: Artículo Científico “Influencia Del Agregado Grueso De La Cantera Del Río Ichu En El Concreto Permeable Para Pavimentos De Bajo Tránsito - $F'c$ 175kg/Cm²”

“INFLUENCIA DEL AGREGADO GRUESO DE LA CANTERA DEL RÍO ICHU EN EL CONCRETO PERMEABLE PARA PAVIMENTOS DE BAJO TRÁNSITO - F'C 175KG/CM2”

(PAUCAR CURASMA, Yesica y MORALES DE LA CRUZ, Franciss Willmoor)

RESUMEN

La presente investigación titulada “Influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - f'c 175kg/cm²”, se realizó en el laboratorio de Ensayo de Materiales y Concreto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Huancavelica de la Universidad Nacional de Huancavelica; el cual centra su estudio en el efecto que tiene el huso granulométrico del agregado grueso en las propiedades mecánicas del concreto permeable, tales como su resistencia a la compresión y permeabilidad (parámetros de relevancia en este tipo de concreto), aplicado para pavimentos de bajo tránsito f'c=175 kg/cm² en la ciudad de Huancavelica, permitiendo el control del escurrimiento superficial y la evacuación de la precipitación pluvial.

Para el diseño de mezcla del concreto permeable de una resistencia de 175 kg/cm², fueron utilizados agregados gruesos de tamaño $\frac{3}{4}$ ”, $\frac{1}{2}$ ” y $\frac{3}{8}$ ”, gradación que representa la granulometría natural del agregado grueso proveniente de la cantera del río Ichu (con un Tamaño máximo de 1”) y que a su vez es recomendada por el ACI 522R-10 “Reporte en concreto permeable”, para la obtención de mayores resistencias a la compresión y permeabilidad adecuada del concreto permeable; analizado esto en 8 probetas cilíndricas para cada tamaño de agregado grueso haciendo un total de 24, a los cuales se realizó el ensayo de resistencia a la compresión (f'c) a los 28 días y 15 probetas cilíndricas para el ensayo de permeabilidad.

De la comparación de las características de los concretos permeables derivados del diseño de mezcla, se determinó que el concreto permeable elaborado con el agregado grueso de tamaño $\emptyset = \frac{3}{4}$ ” es la más idónea, permitiéndonos alcanzar una resistencia a la compresión de 145.21 kg/cm² y coeficiente de permeabilidad de 1.208 cm/s, valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos. Se determinó también el contenido de vacíos en su estado fresco y endurecido. El diseño de mezcla se ha desarrollado conforme los reportes del ACI 522R-10 “Reporte en concreto permeable y ACI 211.3R-02 “Guía para la selección de proporciones para concretos de bajo Slump”, normadas por el ACI.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la escasez de materiales, así como el alto costo de estos y su transporte dieron paso a la utilización de un concreto permeable sin finos que disminuye los contenidos de cemento (pasta) en las mezclas y que sirve de alternativa de solución ante los daños que ocasiona el ser humano a los mantos acuíferos y a los suelos permitiendo transformar la escorrentía superficial en infiltración, por lo tanto, el concreto poroso se puede establecer como una de las medidas innovadoras ante los problemas de inundación suscitadas bajo la

retención de la escorrentía superficial sin afectar el desarrollo urbano.

El concreto permeable es un material con revenimiento cero, compuesto de cemento portland, agregado grueso, poco o nada de agregado fino, que se caracteriza por su alta porosidad que permite el paso del agua a través de su estructura. Esta característica se debe a su alto contenido de vacíos interconectados en el orden de 15 % a 35% dependiendo de los materiales y de su aplicación. A su vez el comité nos brinda otras características que definen el concreto permeable, como su capacidad de

infiltración que varía entre 81 a 731 L/min/m² y su resistencia de 28.55 kg/cm² a 285.51 kg/cm².

La posibilidad de utilizar este material en Huancavelica motivó esta investigación, cuyo objetivo principal consiste en determinar la influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito – f_c 175kg/cm², para lo cual el estudio comprendió la utilización de tres diferentes tamaños de agregado grueso (3/4", 1/2" y 3/8") para la mezcla de concreto permeable a una dosificación de f_c=175kg/cm², con la finalidad de verificar el comportamiento del concreto permeable y obtener el diseño de "idóneo", descrito esto como la obtención de las mejores características, como mayores valores de resistencia a la compresión y permeabilidad adecuada,

Con este estudio que contempla la utilización del concreto permeable para pavimentos de baja tránsito, se pretende conseguir recargar el acuífero, preservar los recursos hídricos, reducir el escurrimiento del agua pluvial o eliminarlo, remover algunos contaminantes, mejorando la calidad del agua. Además, esta práctica reduce o elimina en gran medida la necesidad de áreas de retención costosas y el costo de alcantarillas para la conducción del agua.

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

El crecimiento acelerado de las urbes asociado al proceso de impermeabilización (entendido esto como el uso de pavimentos convencionales en estructuras de áreas urbanas), incrementan la preocupación en la reducción de los agentes contaminantes del agua y del medio ambiente, provocados por el efecto de erosión que se genera a partir del aumento en los volúmenes de escurrimiento superficial lo que ocasiona inundaciones urbanas, colmatación y desborde de los sistemas de drenaje (buzones, cunetas y cajas de drenaje) que a su vez disminuyen la capacidad de recarga natural de los mantos acuíferos.

Perú ha venido experimentando un crecimiento urbano acelerado y año tras año se producen cambios climáticos que genera fenómenos naturales provocados por las estaciones lluviosas con un incremento inusual, afectando en su mayoría a las ciudades de Lima, Ica, Arequipa, Junín entre otras; produciéndose importantes inundaciones en zonas urbanas, ante esto las autoridades locales y regionales no realizan una gestión adecuada para atenuar y contrarrestar los daños provocados por estos fenómenos.

Huancavelica, al ubicarse geográficamente a 3660 msnm, de clima fuerte por ser frío y de altitud, vive actualmente problemas de este tipo, presentando precipitaciones pluviales en abundancia según lo establece el SENAMHI (2015) en los datos del "Registro histórico de precipitaciones pluviales máximas" cuya estación comprende los años 1990 al 2014. Generalmente este fenómeno sucede durante el período de lluvias (diciembre - marzo), afectando negativamente el desarrollo urbano, la circulación vehicular y peatonal afectando considerablemente a puntos críticos situados en los barrios de San Cristóbal, Santa Ana, Yananaco y el distrito de Ascensión. Existe un acontecimiento suscitado en el año 2011 con el desborde del río Ichu, provocando inundaciones de las viviendas aledañas, acumulación de agua contaminada sobre el pavimento, afectando esto a la salud de la población y a su vez al paso vehicular y peatonal en el barrio de San Cristóbal y Santa Ana.

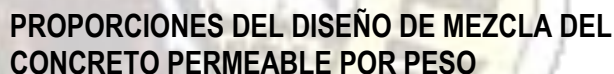
Ante la necesidad de resolver los problemas de inundaciones urbanas y percibir que no existen pruebas ni estudio del concreto permeable con los agregados de la zona; se promovió el desarrollo de esta investigación, con el fin de conocer el comportamiento del concreto permeable con materiales Huancavelicanos en específico el agregado grueso de la cantera del río Ichu y poder determinar cómo es que estas influyen en las propiedades del concreto permeable descritas como el alcance de una mayor resistencia y permeabilidad adecuada para aplicarlos en pavimentos de bajo tránsito de f_c 175 kg/cm² garantizando un menor costo y funcionalidad adecuada.

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

CURVA GRANULOMÉTRICA DEL A. GRUESO Y FINO DE LA CANTERA DEL RIO ICHU (CALLQUI CHICO)



MALLAS SERIE AMERICANA	ANALISIS GRANULOMETRICO				
	ABERTURA (mm)	Pesos Retenidos	RET (%)	PASA (%)	ESPECIFICACIONES "B"
3"	76.200				
2 1/2"	63.500			100	
2"	50.800	0.00	0.00	100	
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	100.00	100
1"	25.400	270.40	3.38	96.62	90 1 1 0 0 0 0 0 0
3/4"	19.050	1151.20	14.39	82.23	65 1 1 0 0 0 0 0 0
1/2"	12.700	1500.20	18.75	63.48	
3/8"	9.525	781.90	9.77	53.70	45 8 0
1/4"	6.350	0.00	0.00	53.70	
Nº 4	4.760	1324.00	16.55	37.15	30 6 5
Nº 6	3.360	0.00	0.00	37.15	
Nº 8	2.380	925.10	11.56	25.59	
Nº 10	2.000	0.00	0.00	25.59	22 5 2
Nº16	1.190	947.90	11.85	13.74	
Nº 20	0.840	0.00	0.00	13.74	
Nº 30	0.590	700.60	8.76	4.98	
Nº 40	0.426	0.00	0.00	4.98	15 3 5
Nº 50	0.297	263.90	3.30	1.69	

Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS DEL ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:

TAMAÑO DE AGREGADO	TESTIGO	f'_c (kg/cm ²) 28 Días	$f'_{c\text{promedio}}$ (kg/cm ²)
3/8	CR ₁ - 3/8	73.85	76.23
	CR ₂ - 3/8	76.42	
	CR ₃ - 3/8	71.37	
	CR ₄ - 3/8	70.87	
	CR ₅ - 3/8	82.45	
	CR ₆ - 3/8	78.36	
	CR ₇ - 3/8	80.56	
	CR ₈ - 3/8	75.96	
1/2	CR ₁ - 1/2	86.54	87.49
	CR ₂ - 1/2	84.19	
	CR ₃ - 1/2	88.55	
	CR ₄ - 1/2	90.48	
	CR ₅ - 1/2	85.96	
	CR ₆ - 1/2	89.32	
	CR ₇ - 1/2	86.12	
	CR ₈ - 1/2	88.74	
3/4	CR ₁ - 3/4	142.52	145.21
	CR ₂ - 3/4	148.75	
	CR ₃ - 3/4	155.57	
	CR ₄ - 3/4	140.18	
	CR ₅ - 3/4	153.98	
	CR ₆ - 3/4	138.45	
	CR ₇ - 3/4	145.87	
	CR ₈ - 3/4	136.32	

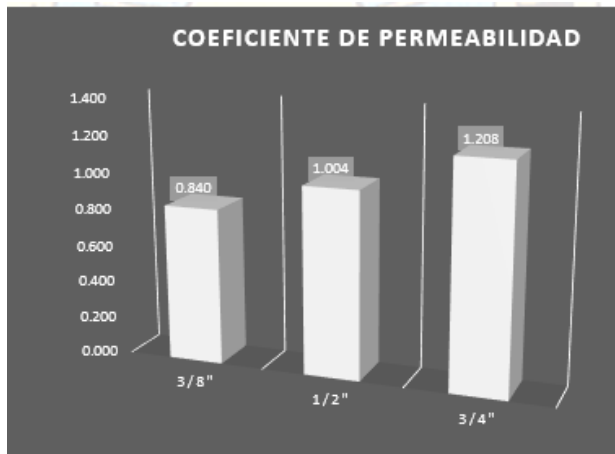
Fuente: Elaboración propia.



Figura: Comparación de la resistencia a compresión de los diferentes tamaños de agregado.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE PERMEABILIDAD

TAMAÑO DE AGREGADO	TESTIGO	K_{promedio} (cm/s)
3/8"	CP ₁ - 3/8	0.840
	CP ₂ - 3/8	
	CP ₃ - 3/8	
	CP ₄ - 3/8	
	CP ₅ - 3/8	
1/2"	CP ₁ - 1/2	1.004
	CP ₂ - 1/2	
	CP ₃ - 1/2	
	CP ₄ - 1/2	
	CP ₅ - 1/2	
3/4"	CP ₁ - 3/4	1.208
	CP ₂ - 3/4	
	CP ₃ - 3/4	
	CP ₄ - 3/4	
	CP ₅ - 3/4	



Figura| Diagrama comparativo del Coeficiente de Permeabilidad del Agregado Grueso de $\phi=3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$.

CONCLUSIONES

En Huancavelica, actualmente no existe ningún tipo de investigación relacionado al estudio del concreto permeable, por lo que la presente tesis, servirá como antecedente a los estudios posteriores, a fin de recabar mayor información que involucre su ejecución.

La utilización del agregado grueso de la cantera del río Ichu ($\phi=3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$) en el diseño de mezcla del Concreto Permeable diseñado para pavimentos de bajo tránsito $f'c=175 \text{ kg/cm}^2$ en la ciudad de Huancavelica, mejora las propiedades del mismo,

El agregado grueso de tamaño de $3/4"$, resultó con un promedio de 145.21 kg/cm^2 en la resistencia a la compresión, siendo este el que alcanzó mayor resistencia para el uso de pavimentos de bajo tránsito, donde el valor obtenido se encuentra en el rango de 28.55 kg/cm^2 a 285.51 kg/cm^2 según lo establece la Norma ACI 522 R -10.

Los resultados obtenidos de los ensayos del coeficiente de permeabilidad, se encuentran dentro del rango 0.14 cm/s a 1.22 cm/s según lo establece la Norma ACI 522 R -10, por lo que podemos concluir que todos los especímenes se encuentran dentro del rango, siendo el agregado grueso de $3/4"$, la que presenta mejor capacidad de infiltración.

Los resultados del ANOVA confirman la influencia significativa que tiene el agregado grueso de la cantera del río Ichu en la resistencia a la compresión del Concreto Permeable, debido a que se aprecia que el nivel de significancia es de 0.000, el cual es menor a 0.05, a su vez se procedió a verificar en la tabla: Límites unilaterales de F al nivel de 5% de probabilidad para el caso de $F>1$, resultando que: Valor calculado (V_c) es mayor que el Valor de la Tabla (V_t), siendo $455.015>3.47$, por ende, se confirma nuevamente la hipótesis alterna.

Los resultados del ANOVA confirman la influencia significativa que tiene el agregado grueso de la cantera del río Ichu en el coeficiente de permeabilidad del Concreto Permeable, debido a que nivel de significancia es de 0.000, el cual es menor a 0.05, a su vez se procedió a verificar en la tabla: Límites unilaterales de F al nivel de 5% de probabilidad para el caso de $F>1$, resultando que: Valor calculado (V_c) es mayor que el Valor de la Tabla (V_t), siendo $461.094>3.89$, por ende, se confirma nuevamente la hipótesis alterna.

En cuanto a los costos económicos se estimó que, en un metro cúbico de base de concreto, utilizando el Concreto Permeable resulta ser más económico que una base de Concreto Convencional, por la menor cantidad de agregado fino utilizado y la adecuada relación a/c consentida.

RECOMENDACIONES

En conformidad a lo concluido por la presente investigación y para futuras investigaciones que trabajen con este tipo de material, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Para el diseño de mezclas se recomienda utilizar los métodos propuestos en el ACI 211.3R – 02 "Guía para el proporcionamiento del concreto de cero Slump", y el ACI 522R-10 "Reporte en Concreto Permeable"
- Se recomienda que, en la ciudad de Huancavelica, se emplee agregados gruesos de tamaño $3/4"$ en el diseño de mezcla, puesto que han demostrado brindar mejores resultados en lo

que respecta a la Resistencia a la Compresión y de Permeabilidad.

- Para un adecuado proceso de mezclado del concreto permeable, se recomienda lo siguiente: Vaciar en la mezcladora parte del agua de diseño, seguido del agregado grueso y fino (si fuese necesario), luego el cemento para finalmente el agua restante. Además, se debe tener en cuenta que el agua debe ser añadida en forma progresiva, debido a que una mínima cantidad de agua generará una mezcla sin consistencia, lo que ocasiona una baja resistencia a la compresión, mientras que una cantidad excesiva de agua, provocará que la pasta selle los poros de la mezcla disminuyendo su capacidad de infiltración.
- Se recomienda estudiar el empleo de otros materiales añadidos en el diseño de mezcla del concreto permeable, como un aditivo incorporador de aire u otro compuesto que permita verificar la viabilidad técnica y económica de su incorporación para mejorar la resistencia a la compresión.
- Tras la irregularidad del acabado de los testigos de concreto permeable para realizar el ensayo de Resistencia a la Compresión, se recomienda tarrajear con mortero (agregado fino y cemento), ya que la distribución de la fuerza aplicada en los especímenes no es uniforme con la utilización de Neopreno, provocando fallas locales.
- También se recomienda el estudio del coeficiente de permeabilidad en las diferentes direcciones que presenta el flujo del agua a causa de las precipitaciones pluviales tanto en sentido "X" y "Y", ya que en la presente investigación solo se realizó en el sentido "Z".
- Ya que no se obtuvo la resistencia a compresión requerida f_c 175 kg/cm², se recomienda realizar investigaciones con diferentes tipos de diseños de mezcla

considerando el porcentaje de vacíos, relación a/c y procedencia del agregado grueso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI2113R. (1988). *Guide for selecting proportions for no-slump concrete. Appendix 7 Pervious concrete mix proportioning.* 211.3R-21. American Concrete Institute.
- ACI522R-10. (2010). *Report on Pervious Concrete.*
- ACI522R-6. (2006). *Pervious Concrete.* American Concrete Institute.
- ASTM-C09.49. (s.f.). *Método de Prueba Alternativos para el concreto permeable.* ASTM International.
- ASTM-D448. (2012). *Clasificación estandar de tamaño de agregado para la construcción de caminos y puentes.* ASTM internacional.
- Barahona, R., Martinez, M., & Zelaya, S. (2013). *Comportamiento del concreto permeable utilizando agregado grueso de la cantera, el Carmen, Aramuaca y la Pedrera, de la zona oriental de el Salvador, San Miguel.* San Miguel: El Salvador. Recuperado el 28 de Enero de 2017
- Brundell, R. (10 de Abril de 2006). *Concreto permeable al agua.* Recuperado el 2017 de Enero de 14, de Cemex: http://www.bnamericas.com/es/news/infraestructura/Cemex_presenta_nuevo_concreto_permeable_al_agua
- Castro, M. (2011). *Pavimentos permeables con alternativa de drenaje urbano.* Bogotá, Colombia.
- Felipe, Y., & Castañeda, L. (2014). *Diseño y aplicación de concreto poroso para pavimentos.* Santiago de Calí, Colombia.
- Fernandez, R., & Navas, A. (2008). *Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad.* San José, Costa Rica.
- Flores, C., & Pacompia, I. (2015). *Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras*

de plástico para pavimentos f/c 175 kg/cm² en la ciudad de Puno. Puno, Perú.

aglomerados porosos para el control en origen de inundaciones. Santander.

Gonzales, A., Oseda, D., Felisicimo, & Gave, J. (2011). *Aprender y enseñar investigación coentífica*. Huancavelica, Perú: Biblioteca Nacional del Perú.

SENAMHI. (2015). *Registro histórico de precipitaciones pluviales en la ciudad de Huancavelica (1990-2014)*. Huancavelica, Perú.

Gonzales, A., Oseda, D., Ramirez, F., & Gave, J. (2011). *Aprender y a enseñar investigación científica*. Huancavelica, Perú: Biblioetca Nacional del Perú.

Torres, E. (2010). *Tecnología del concreto permeable o ecológico en la construcción*. México, México.

Kamali, M., Delkash, M., & Tajrishy, M. (2016). *Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff*. Tehran, Irán.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.027>

Kim, Y., Gaddafi, A., & Yoshitake, I. (2016). *Permeable concrete mixed with various admixtures*. Colorado.
doi:10.1016/j.matdes.2016.03.109

Lian, C., & Zhuge, Y. (2010). *Optimun mix design of enhaced permeable concrete - An experimental investigation*. Adelaide: ELSEVIER.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057

NTP_400.012. (s.f.). *Análisis granulométrico del agregado fino y grueso global*. Norma Técnica Peruana.

NTP_400.021. (2002). *Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción de agregado grueso*. Norma Técnica Peruana.

Pérez, D. (2009). *Estudio experimental del concreto permeable con agregado andesíticos*. México, México.

Sánchez, H., & Reyes, C. (2009). *Metodología y Diseño en la Investigación Científica*. Lima: Visión Universitaria.

Sañudo, Á. (2014). *Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables con superficies de adoquines y*

INFLUENCIA DEL AGREGADO GRUESO DE LA CANTERA DEL RÍO ICHU EN EL CONCRETO PERMEABLE PARA PAVIMENTOS DE BAJO TRÁNSITO - F'C 175kg/cm²

Problema	Objetivos	Marco Teórico	Hipótesis	Variables, dimensiones e indicadores	Metodología
Problema general: ¿Cómo influirá el agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - f'c 175kg/cm²?	Objetivo general: Determinar la influencia del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - f'c 175kg/cm².	1. Antecedentes A NIVEL INTERNACIONAL - LIAN & ZHUGE (2010) "Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation" - KAMALI, DELKASH, & TAJRISHY (2016) "Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff"	Hipótesis general: El agregado grueso de la cantera del río Ichu influye favorablemente en el concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito - f'c 175kg/cm².	Variable independiente: Agregado Grueso • Dimensiones: 1. Granulometría Indicadores: - Tamaño máximo - Módulo de finura - Contenido de humedad - Absorción - Peso específico - Abrasión	1. Tipo de investigación: Aplicada. 2. Nivel de investigación: Explicativa. 3. Método de investigación: Cuantitativo 4. Diseño de Investigación: Experimental. 5. Diseño Específico: Pre Experimental GE: X O Dónde: G.E. Grupo Experimental X: Agregado grueso de la Cantera del río Ichu - X1: 3/8" - X2: 1/2" - X3: 3/4" O: Concreto permeable: - N° de Prueba de Resistencia a la Compresión (f'c): 24 cilindros (ASTM C-39). - N° de Prueba de Infiltración (μ): 12 cilindros (Según ACI 522 R – (06-10) y ACI 211R - 02).
Problemas específicos: 1. ¿De qué manera la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu influirá en la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito f'c 175kg/cm²? 2. ¿De qué manera la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu influirá en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito f'c 175kg/cm²?	Objetivos específicos: 1. Determinar la influencia de la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu en la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito f'c 175kg/cm². 2. Determinar la influencia de la granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu en el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito f'c 175kg/cm².	- KIM, DAGALI Y YOSHITAKE (2016) "Permeable concrete mixed with various admixtures" - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO – México (2009): Pérez. "Estudio experimental del concreto permeable con agregado andesíticos". - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO – México (2010): Candelas. "Tecnología del Concreto Permeable o ecológico en la construcción".	Hipótesis específicas 1. La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu mejora la resistencia a la compresión del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito f'c 175kg/cm²? 3. La granulometría del agregado grueso de la cantera del río Ichu incrementa el coeficiente de permeabilidad del concreto permeable para pavimentos de bajo tránsito f'c 175kg/cm²?	Variable dependiente: Concreto Permeable • Dimensiones: 1. Resistencia a la compresión. Indicadores: - Ensayo de compresión del concreto (ASTM C-39), 2. Coeficiente de permeabilidad. Indicadores: - Ensayo de permeabilidad, ACI 522R-10 y ASTM-C09.49	6. Población La investigación tendrá una población de selección de una muestra representativa del agregado grueso de la cantera de río Ichu de manera aleatoria, para evaluar sus características (pruebas de laboratorio), con los cuales se realizarán diseños de mezcla par el concreto permeable. - 24 Probetas cilíndricas de dimensiones de 15cm de diámetro y 30 cm de alto. 7. Muestra La muestra que se toma de la población es no probabilística de carácter intencional, que a continuación se menciona:

		A NIVEL NACIONAL: - UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO – Perú (2015): Flores y Pacompia. “Diseño de mezcla de concreto permeable con adición de tiras el plástico para pavimentos f’c 175 kg/cm2 en la ciudad de Puno”. 2. Marco teórico referencial: • Agregado Grueso • Concreto Permeable • Permeabilidad • Propiedades mecánicas del concreto • Normas de Diseño de mezcla.		- 24 Probetas cilíndricas de dimensiones de 15cm de diámetro y 30 cm de alto. 8. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos 8.1. Técnicas: Las principales técnicas que se utilizara en esta investigación serán: ✓ La observación directa e indirecta: Se registrará los esfuerzos de compresión y permeabilidad de las probetas. ✓ El análisis documental: Se realizará de forma analítica e interpretativa la información que está a nuestro alcance para extraer lo necesario. ✓ Se seguirá las técnicas indicadas en el ASTM American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana de Pruebas y materiales), NTP (Normas Técnicas Peruanas) y el método ACI (American Concrete Institute). - Contenido de humedad para Agregados: EM 2000, MTC E 108- 2000, basado en la norma ASTM D2216 - Peso específico y absorción de Agregado fino: EM 2000, MTC E 205 -2000, basado en la norma ASTM C128. - Peso específico y absorción de Agregado Grueso: EM 2000, MTC E 206 -2000, basado en la norma ASTM C127. - Peso unitario de los agregados (suelto y compactado): Peso específico y absorción de Agregado fino: EM 2000, MTC E 203 -2000, basado en la norma ASTM C29. - Análisis granulométrico para Agregado fino, grueso y global: EM 2000, MTC E 204 -2000, basado en la norma ASTM C136. - Abrasión los Ángeles (L.A) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½”), basado en la norma ASTM C131.
--	--	--	--	--

				- Diseño de mezcla de Concreto Permeable: Guía para la selección de proporciones para concretos con cero Slump (ACI 211.3R) y el procedimiento de diseño que brinda el Reporte en Concreto. - Permeable (ACI 522R-10) - Densidad y contenido de vacíos de mezclas frescas de concreto permeable: ASTM C1688. - Prueba de revenimiento o Slump: ASTM C143-00. - Ensayo de cono invertido: ASTM C-09.49,2011. - Resistencia a compresión del concreto en muestras cilíndricas: ACI 522R-10. - Permeabilidad: ACI 522R-10. 8.2.Instrumentos: Los instrumentos y equipos que se usará en la investigación para la recolección de datos son: - Equipo para esfuerzo de compresión de testigos y unidades de albañilería. - Balanza calibrada. - Cuaderno de datos. - Fichas técnicas de observación y control de laboratorio. - Fichas de ensayos. - Fichas de resúmenes textuales, comentarios bibliográficos, etc. 9.Procedimiento de datos: Para la recolección de datos se realizará a través de los siguientes trabajos: - Elaboración de un plan de trabajo de laboratorio. - Disposición de herramientas para la recolección del agregado grueso de la cantera del rio Ichu (Callqui Chico) - Ensayos en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil.
--	--	--	--	--

				- Disposición de equipos, herramientas y materiales para la caracterización de los componentes del concreto (agregados fino y grueso, cemento y agua). - Elaboración del diseño de mezcla de concreto permeable para un $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$. - Disposición de equipos y herramientas para la elaboración de probetas cilíndricas. - Elaboración de 24 probetas cilíndricas con diferente tamaño de agregado grueso: $3/8"$, $1/2"$ y $3/4"$. - Ensayo de Densidad y porcentaje de vacíos en estado fresco del concreto permeable. - Ensayos de resistencia a compresión de las 24 probetas cilíndricas. - Ensayo de Densidad y porcentaje de vacíos en estado endurecido del concreto permeable. - Ensayos de permeabilidad de 15 probetas cilíndricas. - Procesamiento los datos obtenidos a través del ensayo de resistencia a compresión y ensayo de permeabilidad.
--	--	--	--	--

TESISTAS:

- PAUCAR CURASMA, YESICA
- MORALES DE LA CRUZ, FRANCIS WILLMOOR

ASESOR: ING. CABALLERO SÁNCHEZ OMAR