



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

Graduación para un agregado grueso con tamaño máximo nominal de 16 mm

Grading for a coarse- aggregate with a maximum nominal size of 16 mm

Valeria Chacón Bolívar

Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
v.chacon.b@gmail.com

Ing. Flor de María Muñoz Umaña, MIng.

Profesora catedrática de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
flor.munoz@ucr.ac.cr

Ing. Einer Rodríguez Rojas, MAP, MIng.

Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
einer.rodriguez@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 6 de mayo del 2022 / Fecha de aprobación: 19 de abril 2023 <https://doi.org/10.15517/mym.v12i0.46889>

Índices y Bases de Datos:

latindex

UCRIndex

REDIB

Dialnet

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

PERIÓDICA

biblat
Bibliografía Latinoamericana

ERIH PLUS
EUROPEAN REFERENCE INDEX FOR THE
HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558

Graduación para un agregado grueso con tamaño máximo nominal de 16 mm

Grading for a coarse- aggregate with a maximum nominal size of 16 mm

Valeria Chacón Bolívar

Estudiante de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
v.chacon.b@gmail.com

Ing. Flor de María Muñoz Umaña, MIng.

Profesora catedrática de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
flor.munoz@ucr.ac.cr

Ing. Einer Rodríguez Rojas, MAP, MIng.

Profesor de Ingeniería Civil
Universidad de Costa Rica, Costa Rica
einer.rodriguez@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 6 de mayo del 2022 / **Fecha de aprobación:** 19 de abril 2023 <https://doi.org/10.15517/mym.v12i0.46889>

RESUMEN

En Costa Rica, la normativa de mayor empleo en materia de especificaciones para valorar la calidad de los agregados para concreto hidráulico, corresponde a la de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), las cuales constituyen la base de las normas del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO).

Por ende, los requerimientos de graduación de los agregados que se sigue en el país provienen de la norma ASTM C33 *Especificación normalizada para agregados para concreto* (INTE C15:2014). Para el diseño de mezclas, esta norma proporciona especificaciones granulométricas para tamaños máximos nominales de 90 mm, 63 mm, 50 mm, 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,7 mm y 9,5 mm.

No obstante, en estudios recientes, Hernández (2018) y Delgado (2018), utilizaron un agregado con tamaño máximo nominal de 16 mm en la elaboración de concreto hidráulico para obtener curvas estándar de desarrollo de resistencia para diferentes tipos de cemento portland que se comercializan en el país. En sus trabajos, tanto Hernández como Delgado, utilizaron agregado grueso de río y agregado grueso de tajo. Para cada caso se usó como referencia granulométrica las especificaciones para tamaños máximos nominales de 12,7 mm y 19 mm que proporciona la norma ASTM C33 (INTE C15:2014), dado que en esta norma no existen especificaciones para agregado de 16 mm.

Fuentes productoras de agregados a nivel nacional están generando una cantidad importante de agregado de 16 mm, por lo que resultó de interés realizar un estudio experimental con muestras estadísticamente válidas, que permitan comprobar con un grado de certeza adecuado la validez de usar la granulometría que mejor se ajuste (tamaño máximo nominal: 12,7 mm o 19 mm) cuando se emplea agregado de 16 mm. Pero también, como parte del estudio, se generó una propuesta de límites granulométricos para un tamaño de 16 mm.

PALABRAS CLAVE: granulometría, agregado grueso, tamaño máximo, concreto.

ABSTRACT

In Costa Rica, the most widely used standard in terms of specifications to assess the quality of aggregates for hydraulic concrete corresponds to that of the American Society for Testing and Materials (ASTM), which constitutes the basis for the standards of the Institute of Technical Standards of Costa Rica (INTECO).

Therefore, the graduation requirements of the aggregates that are followed in the country come from the ASTM C33 standard Specification for aggregates for concrete (INTE C15:2014). For mix design, this standard provides grading specifications for nominal maximum sizes of 90 mm, 63 mm, 50 mm, 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,7mm and 9,5 mm .

However, in recent studies, Hernández (2018) and Delgado (2018), used an aggregate with a nominal maximum size of 16 mm in the production of hydraulic concrete to obtain standard resistance development curves for different types of portland cement that are marketed in the country. In their work, both Hernández and Delgado used coarse river aggregate and coarse pit aggregate. For each case, the specifications for maximum nominal sizes of 12,7 mm and 19 mm provided by the ASTM C33 (INTE C15:2014) standard were used as granulometric reference, since in this standard there are no specifications for aggregate of 16 mm.

Aggregate-producing sources at the national level are generating a significant amount of 16 mm aggregate, so it was interesting to carry out an experimental study with statistically valid samples, which allow verifying with an adequate degree of certainty the validity of using the granulometry that best will fit (nominal maximum size: 12,7mm or 19 mm) when using 16 mm aggregate. But also, as part of the study, a proposal for granulometric limits was generated for a size of 16 mm.

KEY WORDS: grading, coarse aggregate, maximum size, concrete.

INTRODUCCIÓN

A nivel nacional, productoras de agregados generan y comercializan agregado con tamaño máximo nominal de 16 mm, y brindan a los usuarios información sobre la distribución granulométrica que posee su producto; sin embargo, solo es posible cotejar esta información contra las especificaciones correspondientes a tamaños máximos nominales de 12,7 mm o 19 mm de la norma ASTM C33 (2018), dado que esta carece de especificaciones granulométricas para agregado de 16 mm.

Hernández (2018), generó curvas de desarrollo de resistencia a compresión simple de concreto hidráulico usando como “variable de estudio” tres tipos de cementos modificados (MM/C (P-C)-28, MM/C (C-P)-28, MC/A-AR). Para la producción del concreto empleó agregado de río y agregado de tajo, ambos con tamaño máximo nominal de 16 mm. Como parte del estudio realizó la caracterización granulométrica del agregado, y al no existir especificaciones para este tamaño, contrastó la curva granulométrica obtenida con los límites de agregado de 12,7 mm y con los de agregado de 19 mm, siendo la

primera la que mejor se ajustó para el agregado de tajo y la segunda para el agregado de río; los resultados obtenidos por Hernández se muestran en la Figura 1.

Se tiene entonces que, si bien las fuentes proveedoras comercializan el agregado como de 16 mm, sus límites granulométricos se asemejan al de 12,7 mm para el agregado de tajo y al de 19 mm para el agregado de río.

Por su parte, Delgado (2018), realizó un estudio similar al de Hernández (2018) utilizando también el cemento como “variable de estudio”; en este caso los cementos fueron MM/A (E-C) – 28, MM/B (P-C) – 28 y MP A – AR, y al igual que en el estudio de Hernández (2018) usó agregado de 16 mm proveniente de río y de tajo. Delgado (2018) comparó la granulometría de este agregado con las correspondientes a los tamaños máximos nominales de 19 mm a 9.5 mm, 19 mm a 4.75 mm y 12.7 mm a 4.75 mm, encontrando que, para el agregado de río, la mejor aproximación se lograba con la segunda (19 mm a 4.75 mm), mientras que para el agregado de tajo la serie que mejor ajustaba era la tercera (12.7 mm a 4.75 mm), constatando así los resultados que obtuvo Hernández. En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos por Delgado (2018).

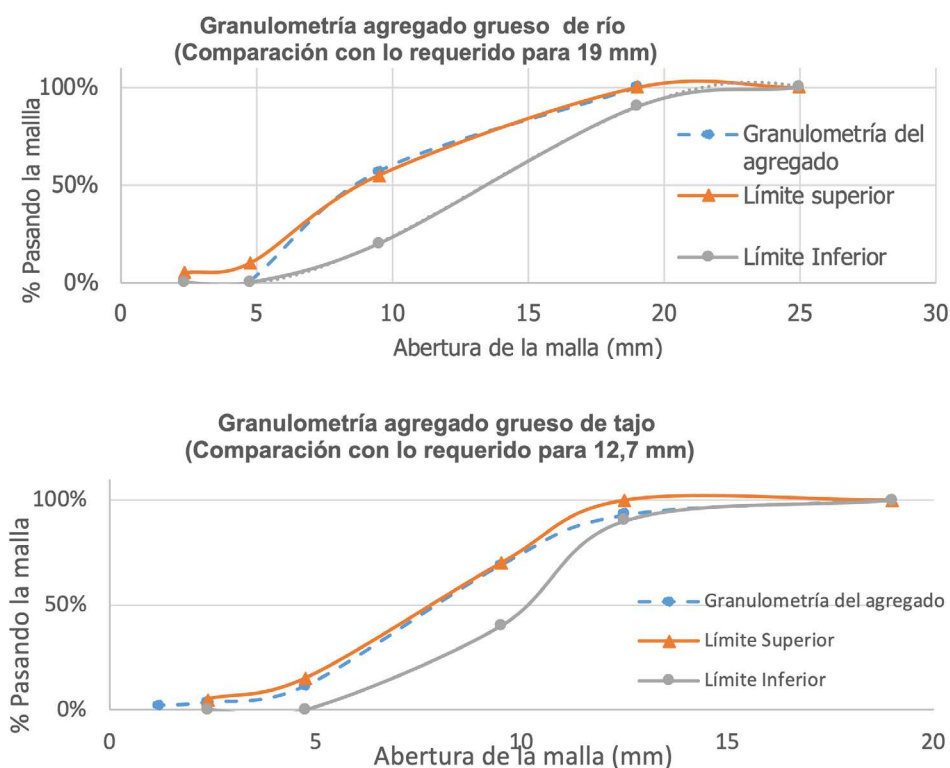


Figura 1. Comparación de granulometría de agregado de 16 mm con las correspondientes a tamaños de 12,7 mm y 19 mm especificadas en ASTM C33 (2018).

Fuente: Hernández, 2018

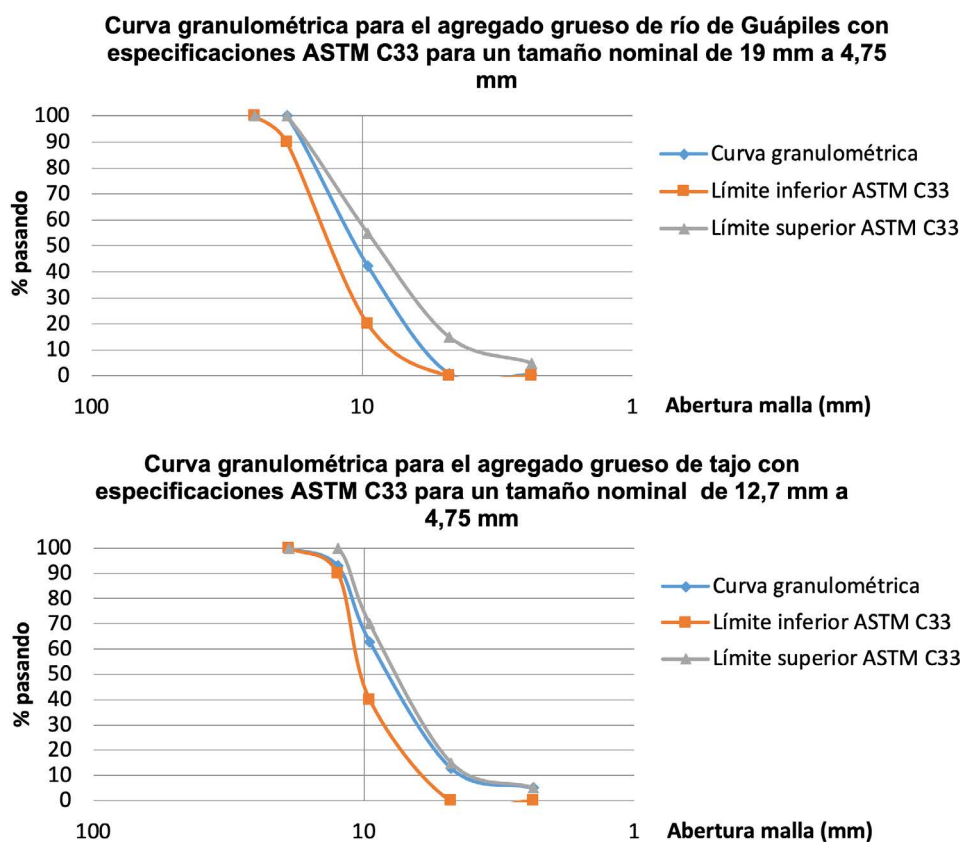


Figura 2. Comparación de granulometría de agregado de 16 mm con las correspondientes a tamaños de 12,7 mm y 19 mm especificadas en ASTM C33 (2018).
Fuente: Delgado, 2018

Si bien los trabajos desarrollados por Delgado (2018) y Hernández (2018), permitieron concluir que, para las fuentes de agregados de dónde provino el material para sus estudios, sus granulometrías se podían comparar con las de 12,7 mm (agregado de tajo) y la de 19 mm (agregado de río) contenidas en la ASTM C33 (2018), ambos recomendaron que, si en el país se comercializa agregado grueso de 16 mm, es conveniente establecer un “estándar granulométrico” para este tamaño de agregado que se produce a nivel local, pues “si bien se obtuvo que el agregado cumple con las especificaciones para otros tamaños nominales en la norma ASTM C33 (2018), finalmente se trata de un agregado al cual no se le puede realizar una verificación directa de este parámetro, y tal como se obtuvo con el trabajo, la distribución de tamaño de sus partículas puede variar considerablemente de una fuente a otra.” (Delgado, 2018, p. 149)

OBJETIVOS

Por lo tanto, el estudio cuyos resultados se presentan en este artículo se centró en:

- Comprobar, a partir de un muestreo estadísticamente válido, si la granulometría correspondiente a un tamaño máximo nominal de 19 mm según ASTM C33 (2018), es apta cuando se emplea agregado de río con un tamaño máximo nominal de 16 mm.
- Comprobar, a partir de un muestreo estadísticamente válido, si la granulometría correspondiente a un tamaño máximo nominal de 12,7 mm según ASTM C33 (2018), es apta cuando se emplea agregado de tajo con un tamaño máximo nominal de 16 mm.
- Generar una propuesta de límites granulométricos para agregados nacionales con tamaño máximo nominal de 16 mm.

METODOLOGÍA

Los ensayos en laboratorio se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). En el Cuadro 1 se indican las normas de referencia utilizadas para cada uno de los ensayos:

Cuadro 1. Normas de referencia utilizadas para cada uno de los ensayos			
Material	Ensayo	Norma INTECO	Norma equivalente
AGREGADOS	Práctica estándar para el muestreo de agregados	INTE C 67	ASTM D 75
	Práctica normativa para reducir las muestras de agregados a tamaño de prueba	INTE C62	ASTM C 702
	Método de ensayo normalizado para materiales más finos que un tamiz No. 200 (75 μ m) en agregados minerales mediante lavado	INTE C 49	ASTM C 117
	Método de ensayo normalizado para la determinación granulométrica de agregados finos y gruesos	INTE C 46	ASTM C 136
	Método de ensayo estándar para determinar la densidad en masa (peso unitario) e índice de huecos en los agregados	INTE C 58	ASTM C 29
	Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados gruesos (ASTM C127) y agregados finos (ASTM C128)	INTE C 68 INTE C 69	ASTM C 127 ASTM C 128
	Método de ensayo normalizado para la detección de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto	INTE C 59	ASTM C 40
	Prueba de abrasión en la máquina de Los Ángeles	INTE C 64	ASTM C 131
	Porcentaje de partículas fracturadas del agregado	INTE C 29	ASTM D 5821
CEMENTO	Muestreo de cemento	INTE C 153	ASTM C 183
	Método de ensayo para la determinación de consistencia normal del cemento hidráulico	INTE C 139	ASTM C 187
	Método de ensayo para la determinación de la densidad del cemento hidráulico	INTE C 141	ASTM C 188
	Método de ensayo para la determinación del tiempo de fragua de un cemento hidráulico por medio de la aguja de Vicat	INTE C 137	ASTM C 191
	Método de ensayo para la determinación de la finura de un cemento hidráulico por medio de la malla de 45 μ m (N° 325)	INTE C 142	ASTM C 430
	Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico-Usando especímenes cúbicos de 50 mm	INTE C 57	ASTM C 109
CONCRETO	Método de ensayo para el asentamiento en el concreto del cemento hidráulico	INTE C 41	ASTM C 143
	Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco por el método de presión	INTE C42	ASTM C 231
	Medición de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado	INTE C 43	ASTM C 1064
	Método para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire del concreto por el método gravimétrico	INTE C 72	ASTM C 138
	Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio	INTE C 18	ASTM C 192
	Método de ensayo para la resistencia a la compresión uniaxial de especímenes cilíndricos de concreto	INTE C 39	ASTM C 39
	Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (usando una viga simple con carga en los tercios medios)	INTE C 45	ASTM C 78

En todos los ensayos se empleó el mismo agregado fino (agregado de tajo) y el mismo tipo de cemento (MM/C (C-P)-28), y agua potable; y se tomaron las medidas para que todos estos materiales se mantuvieran invariables, teniendo así, como única variable, los agregados objeto de estudio.

En primer término, se seleccionaron ocho muestras de agregado fino a las cuales se les realizó el análisis granulométrico siguiendo la norma ASTM C136 (2019), y se obtuvo la desviación entre muestras. A continuación, se determinó para cuatro muestras, su densidad relativa y absorción según ASTM C128 (2015), y para dos de las muestras, su peso unitario según ASTM C29 (2017) e impurezas orgánicas según ASTM C40 (2020).

Se continuó con la granulometría del agregado grueso, para lo cual se efectuaron 30 ensayos granulométricos por fuente (una de río y una de tajo). Con las granulometrías obtenidas se determinó la desviación estándar entre muestras para cada tamiz. Una vez hecha esta caracterización, con base en cuatro muestras se determinó la densidad relativa y absorción según ASTM C128 (2015), el peso unitario para dos muestras según ASTM C29 (2017), y abrasión en máquina Los Ángeles para tres muestras. Las muestras se tomaron del lote almacenado según lo establecido en la norma ASTM D75 (2014) y se almacenaron en baldes debidamente sellados y numerados; posteriormente, se redujeron siguiendo la norma ASTM C702 (2018). Cada muestra se tomó alternadamente de cada balde.

En cuanto al cemento, este se muestreó de acuerdo con lo que establece la norma ASTM C183 (2016). Las muestras fueron tomadas al azar del lote de sacos de cemento destinado para la elaboración de los especímenes de concreto. Para cada ensayo se tomaron dos muestras.

En el ensayo de resistencia a compresión de cubos de mortero según ASTM C109 (2016), por cada muestra se elaboraron 9 cubos (3 cubos por cada edad de falla), y se fallaron a las mismas edades de los cilindros de concreto (3 días, 7 días y 28 días). Los cubos se sumergieron en agua con cal en un recipiente ubicado en la cámara húmeda hasta la edad de falla respectiva.

Una vez obtenidas las características de los agregados y el cemento, se realizó el diseño de mezcla según el método especificado en (ACI 211.1, 2002) La relación agua cemento se mantuvo en 0.56, la resistencia de diseño se especificó en 24 MPa más un factor de seguridad de 4 MPa, y no se emplearon aditivos.

Luego de obtener las dosificaciones, se elaboraron tres cilindros por edad de prueba (3 días, 7 días y 28 días), y una viga, por fuente (río o tajo). Esto para verificar el cumplimiento del asentamiento especificado y realizar los ensayos de fabricación de especímenes de concreto en laboratorio según ASTM C192 (2016), asentamiento según ASTM C143 (2015) y temperatura del concreto ASTM C1064 (2017).

De seguido, se elaboraron 30 cilindros de concreto de 150 mm x 300 mm, por cada fuente. Para cada una de las mezclas se realizó la prueba de asentamiento según ASTM C143 (2015) para monitorear la consistencia de la muestra de concreto fresco, así como la determinación de la temperatura. En adición, se elaboraron tres vigas por cada fuente para la resistencia de diseño (24 MPa) para obtener módulos de ruptura, para lo cual se siguió el método de ensayo descrito en la norma ASTM C78 (2018), que cubre la determinación del esfuerzo de flexión del concreto utilizando una viga simple con carga en los tercios medios; los resultados obtenidos se calcularon y se reportaron como el módulo de ruptura (f_r).

Para la elaboración de los especímenes de concreto, se dividió la muestra total en dos poblaciones, para fabricar 15 cilindros por batida. En la primera batida, además de los 15 cilindros, se elaboraron las 3 vigas, y en la segunda batida se realizó la prueba de contenido de aire según ASTM C231 (2017) y la densidad del concreto fresco según ASTM C138 (2017). Este procedimiento se hizo para los agregados de ambas fuentes (río y tajo).

Para el curado de los especímenes de prueba, estos se mantuvieron en cámara húmeda bajo condiciones ambientales controladas y se fallaron según ASTM C39 (2020) a edades de 3 días, 7 días y 28 días (se fallaron 10 cilindros por edad de prueba, para un total de 30 cilindros para la resistencia de diseño).

Para un mayor control sobre el curado de los especímenes, se zonificó la cámara húmeda en 3 áreas de forma tal que, de los 15 cilindros que se fabricaron por batida, 5 se ubicaron en cada una de estas zonas. Al momento de la falla, se seleccionaron 2 cilindros de la zona 1, dos cilindros de la zona 2, y un cilindro de la zona 3. Antes de fallar los cilindros, se pulieron las superficies para cumplir perpendicularidad y planicidad y se tomaron las medidas para calcular el área promedio de la parte transversal del espécimen de ensayo (dos diámetros y tres alturas).

Los datos recolectados se procesaron utilizando hojas electrónicas creadas en el programa Microsoft Excel. El análisis estadístico se hizo utilizando el software R con el fin de mostrar la significancia de los resultados obtenidos.

Estas pruebas incluyen medidas de tendencia central y variabilidad, pruebas de normalidad, pruebas de valor extremo y pruebas de hipótesis. Además, los gráficos de las curvas granulométricas también se realizaron con el software R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Agregado fino

En el Cuadro 2 y en la Figura 3 se muestran los resultados obtenidos para el agregado fino proveniente de río que se utilizó en todas las mezclas de concreto que se elaboraron (siempre el mismo). La curva granulométrica de la figura 3 corresponde al promedio de 8 ensayos granulométricos, y se hace notar que hubo muy poca variabilidad entre muestras.

Cemento

Como se indicó anteriormente, el cemento utilizado fue el MM/C (C-P)-28. Los resultados de los ensayos para este cemento se presentan en el Cuadro 3 y en la Figura 4.

Para obtener los resultados promedio, se verificó que el rango máximo permisible entre especímenes hechos de una misma mezcla de mortero y a la misma edad, es de 8.7 % del promedio cuando tres cubos representan la edad de ensayo, y de 7.6 % cuando dos cubos representan la edad de ensayo.

Cuadro 2. Resumen de las propiedades físicas del agregado fino de río

Propiedad física	Valor promedio	Valor usual
Módulo de finura (M.F.)	2,72	2,3 – 3,1
Material lavado pasando la No.200 (%)	4,6	> 5
Gravedad específica, G_{BS}	2,52	2,4 – 2,9
Densidad, D_{BS} (kg/m^3)	2516	2400 – 2900
Absorción, D (%)	3,2	0,2 – 2
Peso unitario suelto, δ_{suelto} (kg/m^3)	1517	1120 – 1900
Peso unitario varillado, $\delta_{varillado}$ (kg/m^3)	1641	
Relación de vacíos, e (%)	40	40 – 50
Porosidad, n	0,28	0,29 – 0,33
Impurezas orgánicas	Conforme	Solución más clara que el vidrio color estándar de Gardner No.3
Humedad, W_{lab} (%)	2,9	0,2 - 2

Curva granulométrica promedio del agregado fino de río

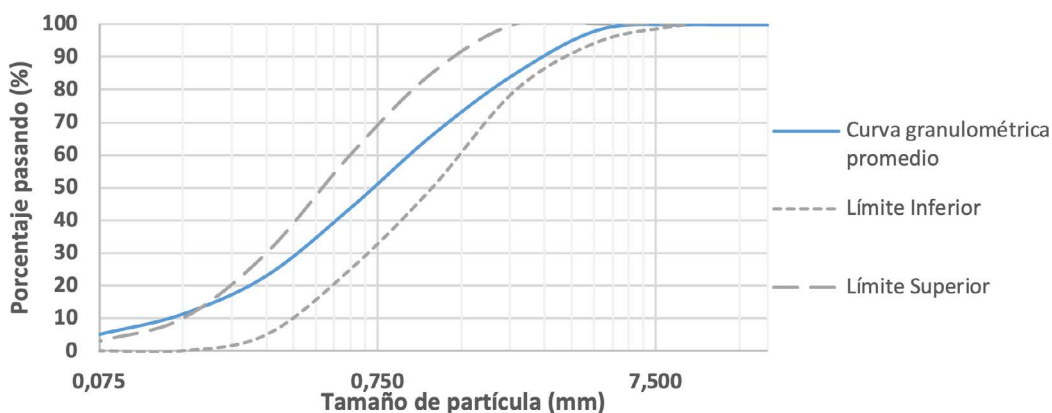


Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino (promedio de ocho muestras)

Cuadro 3. Resultados de las propiedades físicas del cemento MM/C (C-P)-28 utilizado		
Propiedad	Valor promedio	Valor usual
Agua para consistencia normal (%)	30	27 – 30
Densidad relativa	2,81	2,8 – 2,85
Tiempo de fragua inicial (min)	111	90
Tiempo de fragua final (min)	264	240
Finura por material pasando tamiz de 45 μm (%)	94,8	94

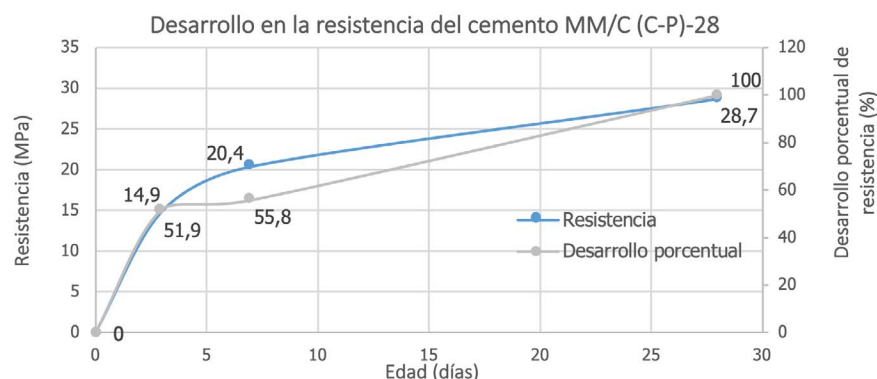


Figura 4. Curva de desarrollo de resistencia en cubos de mortero de cemento MM/C (C-P)-28 (promedio de dos réplicas de 9 cubos cada una)

Agregado grueso

El agregado grueso constituyó la variable en este estudio. Se realizaron 30 ensayos granulométricos para el agregado de tajo y otros 30 para el agregado de río y se obtuvo, para cada caso, el promedio que se presenta en el Cuadro 4 y en el Cuadro 5.

Es importante indicar que, antes de definir una granulometría promedio, primero se realizó un análisis estadístico de los datos para determinar su distribución y verificar si estos cumplían con una distribución normal, como también para detectar valores extremos que afectarían el cumplimiento de la distribución normal de los datos. A partir de estas granulometrías promedio se procedió con el resto de los ensayos, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 4. Granulometría del agregado grueso de río (promedio de 30 muestras)					
Tamiz	Tamaño (mm)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje pasando	Desviación estándar(%)
3/4"	19	0,0	0,0	100	0,0
1/2"	12,7	23,7	23,7	76,3	2,2
3/8"	9,5	52,7	76,3	23,7	2,1
No.4	4,75	23,4	99,7	0,3	2,6
No.8	2,36	0,0	99,7	0,3	0,0
No.16	1,18	0,0	99,7	0,3	0,0
No.30	0,60	0,0	99,8	0,2	0,0
No.50	0,30	0,0	99,8	0,2	0,0
No.100	0,15	0,0	99,8	0,2	0,0
No.200	0,075	0,0	99,8	0,2	0,0
Charola	N/A	0,1	99,9	0,1	0,0
Promedio de material lavado pasando la No.200		0,1			0,04

Cuadro 5. Granulometría del agregado grueso de tajo (promedio de 30 muestras)

Tamiz	Tamaño (mm)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje pasando	Desviación estándar (%)
3/4"	19	0,0	0,0	100	0,0
1/2"	12,7	10,3	10,3	89,7	2,0
3/8"	9,50	32,9	43,2	56,8	4,1
No.4	4,75	49,3	92,5	7,5	1,7
No.8	2,36	6,8	99,5	0,5	0,1
No.16	1,18	0,2	99,7	0,3	0,1
No.30	0,60	0,0	99,7	0,3	0,1
No.50	0,30	0,0	99,7	0,3	0,1
No.100	0,15	0,0	99,7	0,3	0,1
No.200	0,075	0,0	99,8	0,2	0,1
Charola	N/A	0,0	99,8	0,2	0,1
Promedio de material lavado pasando la No.200		0.3			0,14

Cuadro 6. Resumen de las propiedades físicas de los agregados gruesos utilizados

Propiedad física	Valor promedio		Valor usual
	Río	Tajo	
Tamaño máximo (mm)	16	16	-
Material lavado pasando la No.200 (%)	0,1	0,3	1
Gravedad específica, G_{BS}	2,64	2,51	2,4 – 2,8
Densidad, D_{BS} (kg/m^3)	2630	2509	2400 – 2900
Absorción, D (%)	1,8	2	0,2 – 4
Peso unitario suelto, δ_{suelto} (kg/m^3)	1408	1402	1120 – 1900
Peso unitario varillado, $\delta_{varillado}$ (kg/m^3)	1539	1485	
Relación de vacíos, e (%)	47	44	30 - 45
Porosidad, n	0,32	0,31	0,23 – 0,31
Pérdida por abrasión (%)	18	16	> 50
Partículas fracturadas (%)	95	100	-
Humedad, W_{lab} (%)	0,9	0,7	0,5 - 2

Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron las pruebas de normalidad de Jarque-Bera y Anderson-Darling para determinar si los resultados cumplían o no con una distribución normal. Cuando no cumplieron normalidad, se realizaron dos pruebas para comprobar la presencia de valores atípicos (Test de Dixon y Test de Grubbs), y eliminar el valor atípico. Posteriormente, se volvieron a realizar las pruebas de normalidad para verificar su cumplimiento. Por último, se realizó la prueba z o la prueba t de Student, según el tamaño de

la muestra, para establecer si los resultados entre ambas fuentes son estadísticamente iguales o no y obtener el intervalo de confianza con un 95 %. Como el análisis estadístico se hizo para cada tamaño de tamiz, se obtuvo que, los tamaños de 12,7 mm (1/2") y 9,5 mm (3/8"), tanto para el agregado de tajo como para el de río, cumplieron con la distribución normal, pero a partir del tamiz de 4,75 mm (No.4), se observa que los datos correspondientes al agregado de tajo no cumplen normalidad en al menos una de las pruebas realizadas.

Una vez que se verificó que todos los datos cumplían con una distribución normal, se continuó con la prueba de hipótesis para determinar, con base en el porcentaje pasando, si las poblaciones estudiadas son estadísticamente iguales o no. Para esto se realizó la prueba z en caso de tener 30 o más observaciones (N), o la prueba t de Student si eran menos de 30 observaciones.

En el caso del agregado de río todos los datos granulométricos cumplieron con la distribución normal, pero para el agregado de tajo fue necesario eliminar valores atípicos para cumplir con la normalidad en la mayoría de los tamices.

En la Figura 5 se pueden observar las 30 curvas granulométricas del agregado grueso de río (color verde) y las 30 curvas granulométricas del agregado grueso de tajo (color gris tenue). Además, en un color más oscuro (verde oscuro y gris oscuro) se distinguen los intervalos con un 95 % de confianza para cada caso.

Los registros históricos proporcionados por los proveedores, correspondientes a diferentes años, permitieron comparar la tendencia granulométrica histórica del agregado grueso de 16 mm con la obtenida en los ensayos de laboratorio que se realizaron como parte de este estudio. Con base en esta información se determinó que, para el agregado de tajo hay muy poca variación en la mayoría de los tamices, y solo el de 9,5 mm (3/8") presentaba una mayor variación (7,2 %). Para el agregado grueso de río las variaciones son incluso menores que las reportadas para el de tajo, pero se destaca que es también el tamiz de 9,5 mm (3/8") el que reporta la mayor variación (5,4 %). En la figura 6 se muestran las curvas granulométricas promedio del agregado grueso de río (color verde) y el agregado grueso de tajo (color gris) trazadas con base en los registros históricos.

A continuación, en la Figura 7 se puede observar el comparativo de curvas granulométricas obtenidas en este trabajo y las incluidas en la Figura 6.

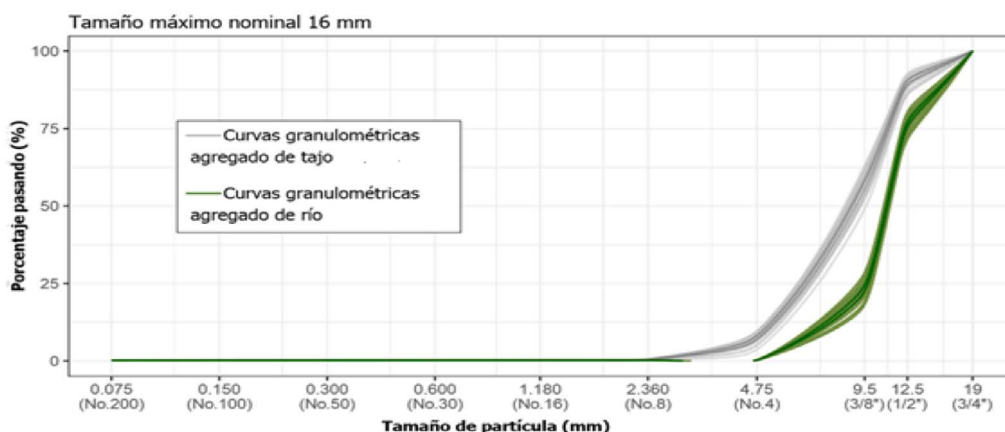


Figura 5. Curvas granulométricas de agregado grueso de tajo y río, e intervalos con un 95 % de confianza.

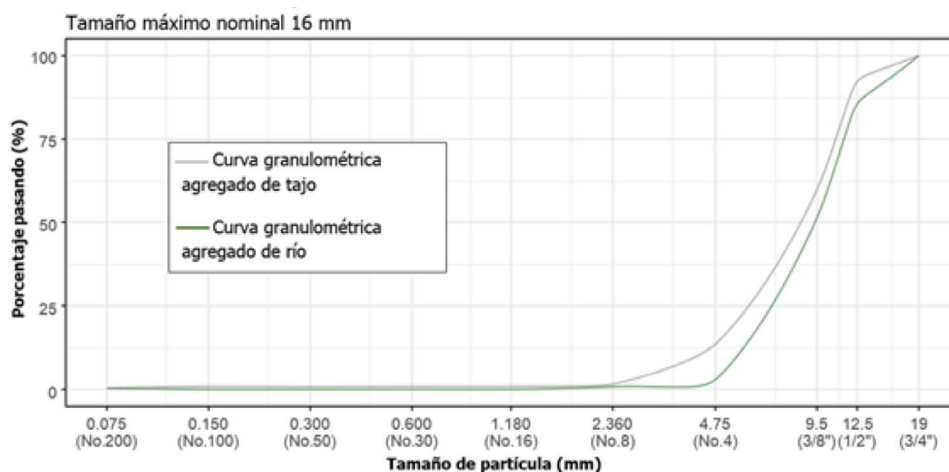


Figura 6. Curvas granulométricas construidas a partir de datos históricos suministrados por las fuentes de agregados.

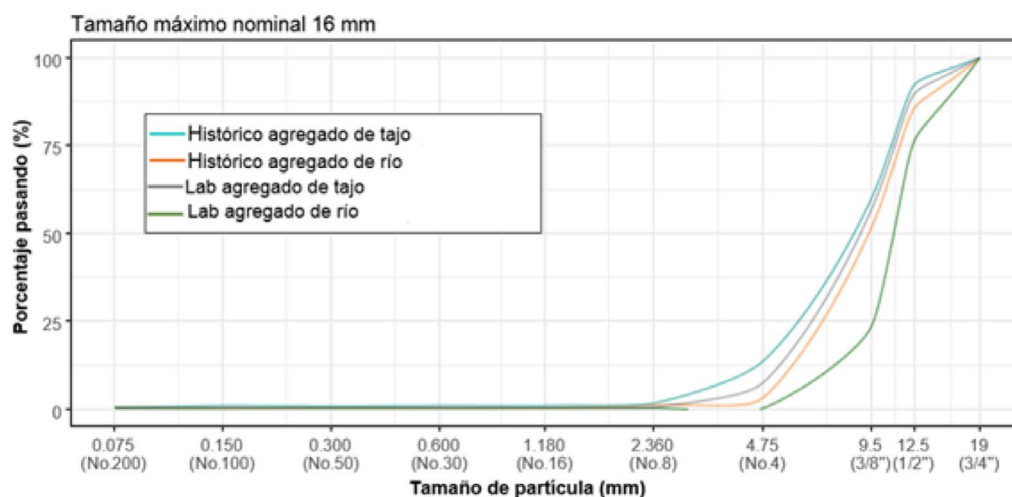


Figura 7. Curvas granulométricas promedio del agregado grueso de río y agregado grueso de tajo, resultantes de los registros históricos de los quebradores y los resultados obtenidos en este trabajo.

Con base en el análisis estadístico de los resultados de los ensayos de granulometría y, considerando también, el comportamiento granulométrico de estos agregados atendiendo a los registros históricos de los ensayos proporcionados por los quebradores, se definió una propuesta de límites granulométricos para un agregado con tamaño máximo nominal de 16 mm que se observa en el Cuadro 7.

Tamiz	Tamaño (mm)	Porcentaje pasando (%)	
		Límite superior	Límite inferior
3/5"	16,0	100	100
1/2"	12,7	100	70
3/8"	9,5	65	20
No.4	4,75	10	0
No.8	2,36	2	0
No.16	1,18	0	0
No.30	0,60	0	0
No.50	0,30	0	0
No.100	0,15	0	0
No.200	0,075	0	0

De acuerdo con la ASTM C33 (2018), para un tamaño máximo nominal de 12,7 mm, se admite en ese tamiz un sobre tamaño de 10 % de la masa seca al horno; en esta propuesta, pasa el 100 % en el tamiz de 16 mm pero se puede retener hasta un 30 % en el tamiz de 12,7 mm

Concreto hidráulico

Con base en la granulometría propuesta se elaboraron dos diseños de mezcla atendiendo al procedimiento establecido por la (ACI 211.1, 2002) *Método estándar para el proporcionamiento de mezclas de concreto de peso liviano, normal y masivo.*; en un caso se utilizó agregado de río y en otro agregado de tajo, respetando en ambos casos la granulometría propuesta en este trabajo. El resto de los factores que intervienen en el diseño se mantuvieron constantes, no obstante, se hace la salvedad que, debido a la capacidad de la batidora, para satisfacer la cantidad de mezcla para elaborar 30 cilindros, se hicieron dos baches de 15 cilindros para mezclas con agregado de tajo y otros dos baches para mezclas con agregado de río, y se llevó control de los parámetros indicados en el Cuadro 8.

En la Figura 8 se incluyen los resultados de la resistencia a compresión simple en cilindros de concreto para la mezcla con agregado de río y para la mezcla con agregado de tajo, utilizando la granulometría respectiva propuesta en este trabajo para agregado de 16 mm.

Cuadro 8. Parámetros de control de las mezclas de concreto en cada bache producido.

Parámetro	Mezcla de concreto con agregado de río		Mezcla de concreto con agregado de tajo	
	Valor obtenido		Valor obtenido	
	Bache 1	Bache 2	Bache 1	Bache 2
Temperatura de la mezcla (°C)	26,2	27,3	27,1	26,0
Asentamiento (mm)	150	180	190	180
Contenido de aire (%)	-	1,4	-	1,3
Densidad del concreto fresco (kg/m³)	-	2278,4	-	2230,4
Relación agua cemento (a/c)	0,56	0,56	0,56	0,56

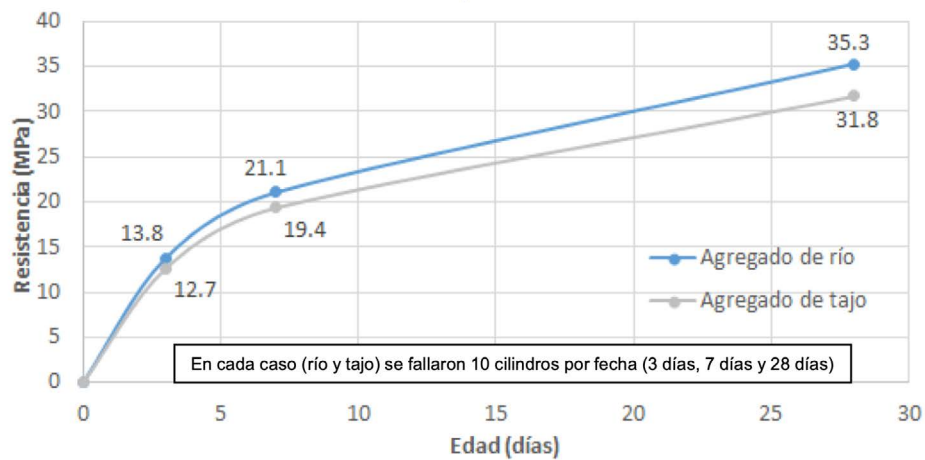


Figura 8. Curvas de desarrollo de resistencia para concretos hidráulicos elaborados con la granulometría propuesta para agregado de 16 mm.

La resistencia de diseño fue de 24 MPa y se usó un factor de seguridad de 4 MPa, por lo que, bajo condiciones controladas en laboratorio, se alcanzaron resistencias superiores a la de diseño.

Finalmente, con respecto al módulo de rotura de las vigas de concreto a 28 días, se fabricaron 3 con el agregado grueso de tajo y 3 con el agregado grueso de río, empleando la granulometría propuesta en este trabajo para el agregado de 16 mm, y el resto de los factores constante. Los resultados obtenidos están contenidos en el Cuadro 9.

Al relacionar el módulo de ruptura con la resistencia a compresión se obtiene que, cuando se usa agregado de río en la mezcla, el módulo de ruptura a 28 días es un 10,6 % del valor de la resistencia a compresión; y al utilizar agregado de tajo, el módulo de ruptura representa un 13,6 % de la resistencia a compresión, lo que indica que en ambos casos se cumple con los valores teóricos típicos establecidos entre 10 % y 20 %.

Cuadro 9. Módulo de ruptura del concreto obtenido usando la granulometría propuesta para un tamaño de 16 mm

Edad (días)	Módulo de ruptura (MPa)	
	Río	Tajo
28	3,74	4,31

CONCLUSIONES

La granulometría del agregado grueso de tajo, comercializado como de 16 mm, se asemeja a la granulometría contemplada en la norma ASTM C33 (2018), correspondiente a un tamaño máximo nominal de 12,7 mm.

La granulometría del agregado grueso de río, comercializado como de 16 mm, no se asemeja ni a la granulometría para un tamaño máximo nominal de 19 mm, como tampoco, a la del tamaño de 12,7 mm, que especifica la ASTM C33 (2018).

El promedio de los porcentajes pasando los tamices de 12,7 mm (1/2"), 9,5 mm (3/8"), 4,75 mm (No.4) y 2,36 mm (No.8) presentan una diferencia significativa, por lo que los resultados entre ambas fuentes de agregado (río y tajo), son distintos.

En atención a los porcentajes pasando en cada tamiz, el agregado de tajo es más fino que el agregado de río, a pesar de ser comercializados con el mismo tamaño nominal, lo que evidencia la necesidad de definir una curva granulométrica (límite inferior y superior) para un tamaño máximo nominal de 16 mm.

A partir de muestras estadísticamente válidas, y con un nivel de confianza de 95 %, se definió una propuesta de límites granulométricos (inferior y superior) para agregado grueso de 16 mm.

La curva granulométrica histórica del agregado grueso de río se encuentra dentro de los límites granulométricos propuestos en esta investigación. Mientras que, la curva granulométrica histórica del agregado grueso de tajo se acerca considerablemente al límite superior, e incluso sobrepasa este límite en el tamiz de 4,75 mm (No.4).

REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2002). *ACI 211.1-91 Práctica estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo*.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D75-14. Práctica normativa para el muestreo de agregados*.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C128-15. Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa o gravedad específica, y la absorción de agregados finos*.
- American Society for Testing and Materials. (2015). *ASTM C143/C143M-15. Método de prueba estándar para determinar el asentamiento de concreto de cemento hidráulico*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C109-16. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C183-16. Práctica normalizada para muestreo y cantidad de pruebas de cemento hidráulico*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *ASTM C192-16. Práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C1064-17/C1064M-17. Método de prueba estándar para determinar la temperatura del concreto fresco de cemento hidráulico*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C138-17/C138M-17a. Método de prueba estándar para determinar la densidad (peso unitario) y rendimiento del concreto fresco*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C231-17/C231M-17a. Método de prueba estándar para determinar el contenido de aire de concreto fresco con el método de presión*.
- American Society for Testing and Materials. (2017). *ASTM C29/C29-17a. Método de prueba estándar para determinar la densidad masiva ("Peso unitario") y vacíos en agregados*.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C33-18/C33M-18. Especificaciones estándar para agregados para concreto*.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C702/C702M-18. Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaño de ensayo*.
- American Society for Testing and Materials. (2018). *ASTM C78-18/C78M-18. Método de prueba estándar para determinar la resistencia a flexión del concreto*.

- American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM C136/C136M-19. Método de prueba estándar para el análisis por mallas para el agregado fino y grueso.*
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C39-20/C39M-20. Método de prueba estándar para determinar la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto.*
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C40/C40M-19. Método de prueba estándar para determinar impurezas orgánicas en agregado fino para concreto.* ASTM Internacional.
- Delgado, J. A. (2018). *Curvas características de resistencia a compresión simple en concreto usando distintos tipos de cementos modificados.* Proyecto final de graduación para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Hernández, L. F. (2018). *Resistencia a la compresión simple versus tiempo de curado en especímenes de concreto hidráulico usando cementos modificados.* Proyecto final de graduación para optar por el título de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica , San José .