

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA CIVIL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL E INGENIERA CIVIL**

**TEMA:
MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL HORMIGÓN SIMPLE UTILIZANDO EL
MODELO DE VIGA A FLEXIÓN Y SU COMPARACIÓN CON LA FÓRMULA PROPUESTA
EN EL ACI 318-19**

**AUTORES:
CÉSAR RAÚL AGUILERA MATAMOROS
KIMBERLY ALEXANDRA AGUIRRE VILLAVICENCIO**

**TUTOR:
JOSÉ DOMINGO ALVIAR MALABET**

Quito, agosto del 2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros César Raúl Aguilera Matamoros y Kimberly Alexandra Aguirre Villavicencio, con documentos de identificación N° 080308931-7 y N° 172665803-0, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL HORMIGÓN SIMPLE UTILIZANDO EL MODELO DE VIGA A FLEXIÓN Y SU COMPARACIÓN CON LA FÓRMULA PROPUESTA EN EL ACI 318-19, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil e Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, agosto del 2021



.....
César Raúl Aguilera Matamoros

CI: 080308931-7



.....
Kimberly Alexandra Aguirre Villavicencio

CI: 172665803-0

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL HORMIGÓN SIMPLE UTILIZANDO EL MODELO DE VIGA A FLEXIÓN Y SU COMPARACIÓN CON LA FÓRMULA PROPUESTA EN EL ACI 318-19 realizado por César Raúl Aguilera Matamoros y Kimberly Alexandra Aguirre Villavicencio, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, agosto del 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Domingo Alviar Malabet', with a stylized flourish at the end.

José Domingo Alviar Malabet

C.I.: 175783760-2

MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE DEL HORMIGÓN SIMPLE UTILIZANDO EL MODELO DE VIGA A FLEXIÓN Y SU COMPARACIÓN CON LA FÓRMULA PROPUESTA EN EL ACI 318-19

MEASUREMENT OF THE SHEAR STRENGTH OF SIMPLE CONCRETE USING THE BENDING BEAM MODEL AND ITS COMPARISON WITH THE FORMULA PROPOSED IN ACI 318-19

César Aguilera-Matamoros¹, Kimberly Aguirre-Villavicencio², José Alviar-Malabet³

Resumen

En la presente investigación se realizó un análisis comparativo de las vigas de hormigón sometidas a corte de forma experimental cuando existe refuerzo longitudinal, pero no poseen refuerzo transversal; y la derivada de la fórmula propuesta en el ACI 318-19 [1], como se indica en la Ecuación 1. Actualmente no existe una normativa que regule el ensayo para cuantificar la resistencia al corte del hormigón, por esta razón, a partir del método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (ASTM C78), se obligó a la viga a fallar por cortante. Se evaluaron 36 vigas de hormigón, cuyo diseño de la mezcla fue realizado con el método de ASOCRETO, en el cual se empleó una relación a/d fija, donde “a” es la distancia entre la aplicación de la carga y el apoyo y, “d” el peralte efectivo de la viga; se varió la cuantía de refuerzo (ρ) entre la mínima, la máxima y el promedio entre las mismas, y se varió la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c) de 21, 24 y 28 MPa. Los valores de resistencia al corte obtenidos de los ensayos realizados se compararon con los valores obtenidos mediante la fórmula propuesta en el ACI 318-19.

Palabras Clave: Acero, Hormigón, Refuerzo longitudinal, Resistencia al corte, Viga.

Abstract

In the present investigation was realized a comparative analysis of the concrete beams subjected to experimental shear when there is longitudinal reinforcement, but there is not transverse reinforcement; and the derivative of the formula proposed in ACI 318-19 [1], as indicated in Equation 1. Actually there is no standard that regulates the test to quantify the shear strength of concrete, for this reason, from the Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (ASTM C78), the beam was forced to fail per shear. 36 concrete beams were evaluated, whose design of the mixture was carried out with the ASOCRETO method, in which a fixed ratio a/d was used, where “a” is the distance among application load and the support and “d” is the effective depth; the reinforcement ratio (ρ) was varied between the minimum, the maximum and the average between them, and the compressive strength of the concrete (f'_c) was varied from 21, 24 and 28 MPa. The shear resistance values obtained from the test realized were compared with the values obtained through the proposal formula in ACI 318-19.

Keywords: Steel, Concrete, Longitudinal reinforcement, Shear resistance, Beam.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: caguileram@est.ups.edu.ec; kaguirrev1@est.ups.edu.ec

1. Introducción

En la ingeniería civil constantemente se están desarrollando nuevas técnicas e investigaciones que permiten progresar a la construcción, a causa de ello es necesario avanzar a la par del desarrollo de la sociedad, para así contribuir económicamente al país y mejorar los procesos constructivos brindando confiabilidad y seguridad en la construcción.

Para procurar dicho avance, seguridad y confiabilidad en la construcción, a nivel mundial se realizan investigaciones que contribuyan específicamente al estudio del hormigón al verse sometido a distintas fuerzas y a distintas condiciones.

Es el caso de la resistencia a compresión o tracción en el hormigón, comúnmente se realizan ensayos de la resistencia a la flexión del hormigón y se evalúan dichas mediciones para mejorar ciertas falencias que en él existan; a diferencia de la resistencia al corte del hormigón, la cual carece de un ensayo normado que permita la obtención de un valor de resistencia al corte.

Por ello, se harán comparaciones con los valores que se obtengan experimentalmente al ensayar la viga de hormigón con acero de refuerzo longitudinal (ensayo de la resistencia a la flexión del hormigón) y los derivados de la resistencia al corte del hormigón al utilizar la fórmula del ACI 318-19 [1], la cual se detalla más adelante en la Ecuación 1.

Cabe mencionar que en esta investigación se elaborará un total de 36 vigas de hormigón; de las cuales se repartirán 12 vigas para cada valor de resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$) 21, 24 y 28 MPa, las mismas en las que se harán variaciones de la cuantía de refuerzo longitudinal ($\rho_{mín}$, $\rho_{máx}$, $\rho_{promedio}$), donde: $\rho_{promedio}$ es el promedio entre la cuantía de refuerzo longitudinal mínima y máxima; y se fijará la relación a/d , donde “a” es la distancia entre la aplicación de la carga y el apoyo y, “d” el peralte efectivo de la viga.

Las variaciones mencionadas anteriormente permitirán obtener diferentes valores de la resistencia al corte del hormigón con el fin de obtener resultados confiables.

2. Materiales y Métodos

En el presente artículo se utilizó agregados provenientes de la cantera del sector de Pintag, (minera REVTON S.A.).

El agregado grueso posee una coloración rojiza, de forma angulosa, poco poroso y poco húmedo, como se puede observar en la Figura 1a; en cuanto al agregado fino, este también posee una coloración rojiza, contiene partículas gruesas y es húmedo, como se puede observar en la Figura 1b.



Figura 1. a) Agregado grueso, b) Agregado fino.

2.1. Caracterización de los materiales

Para el diseño de las mezclas de hormigón es necesario realizar ensayos que permitan caracterizar a los agregados, y para ello se realizó inicialmente la homogeneización y reducción de muestras (ASTM C702) [2], como se muestra en la Figura 2. Posterior a ello se realizaron los ensayos que se describen a continuación.



Figura 2. Homogeneización y reducción de los agregados.

2.2. Descripción de los ensayos

2.2.1 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico tiene por finalidad determinar el tamaño de los agregados fino y grueso, al pasarlos a través de una serie de tamices de abertura cuadrada, ordenados ascendentemente, véase Tabla 1. Este ensayo se lo realizó en base a la norma ASTM C136 [3].

Tabla 1: Tamices según el tipo de agregado.

Agregado	ASTM C136	(mm)
Grueso	2"	50,8
	1 1/2"	37,5
	1"	26,5
	3/4"	19
	1/2"	13,2
	3/8"	9,5
Fino	Nº4	4,75
	Nº8	2,36
	Nº16	1,18
	Nº30	600 µm
	Nº50	300 µm
	Nº100	150 µm
	Nº200	75 µm

2.2.2 Peso específico y absorción

Este ensayo permite determinar el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca (SSS), peso específico aparente y la absorción pasadas 24 horas de sumersión de los agregados grueso y fino, este procedimiento esta normado por la norma ASTM C128 [4], para el agregado fino, y la ASTM C127 [5], para el agregado grueso.

2.2.3 Pesos unitarios

Este ensayo tiene como finalidad la obtención del peso volumétrico de los agregados fino y grueso, ya sea en estado suelto o compactado y determinar los vacíos entre las partículas de los agregados, procedimiento que se detalla en la norma ASTM C29 [6].

El peso volumétrico representa la masa de unidad de volumen que corresponde al árido total que incluye el volumen ocupado por las partículas

de los agregados y los vacíos que existen entre ellas, se expresa en kgf/m^3 .

2.2.4 Desgaste a la abrasión

Este método de ensayo permite conocer el porcentaje de desgaste del agregado grueso al ser sometido a la máquina de los Ángeles, además de la durabilidad y resistencia que tendrá el hormigón, el cual se describe en la norma ASTM C131M [7].

El porcentaje de abrasión del agregado grueso describe la calidad del mismo, es decir, que al obtener un alto porcentaje de abrasión existirá mayor desgaste de las partículas provocando una baja calidad de los agregados y viceversa.

2.2.5 Contenido de impurezas orgánicas

Este ensayo establece el método para determinar de forma aproximada la presencia de cantidades de impurezas orgánicas en el agregado fino, las cuales afectan la hidratación del cemento y perjudican al desarrollo de la resistencia del hormigón, esta prueba se lleva a cabo por medio de la prueba colorimétrica con hidróxido de sodio, como se muestra en la Figura 3, detallada en la norma ASTM C40 [8].



Figura 3. Prueba de impurezas inorgánicas en el agregado fino.

2.2.6 Contenido de humedad

Se basa en la norma ASTM C566 [9], definida como la cantidad de agua superficial que retienen

los poros o agua libre que exista entre las partículas del agregado.

2.2.7 Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón

Este ensayo tiene como finalidad determinar la resistencia a la compresión del hormigón, para así verificar la dosificación del hormigón, su correcto mezclado y su efectividad en su posterior uso. Este importante ensayo se detalla en la norma ASTM C39 [10].

2.2.8 Ensayo para la determinación de la resistencia a la flexión del hormigón

Este método de ensayo establece la determinación la resistencia a la flexión de especímenes prismáticos (vigas de hormigón), ensayo del cual se obtiene el módulo de rotura, que puede variar según la toma de la muestra, moldeado y posterior curado.

Este ensayo es comúnmente utilizado en pruebas de hormigón en losas y vigas, se establece su procedimiento en la norma ASTM C78-02 [11], en la cual se explica que el espécimen de ensayo (viga) debe ser colocado en la máquina de manera que la carga sea aplicada sobre los tercios medios de la misma, lo que asegurará que las fuerzas aplicadas sean perpendiculares a la cara del espécimen.

2.3. Metodología

La metodología de investigación a emplearse será experimental, enfocada a cumplir con el objetivo del tema principal, a través de resultados de los ensayos a realizarse.

El objeto de estudio consiste en comparar la resistencia al corte del hormigón medida en laboratorio y la derivada de la fórmula del ACI 318-19 [1], cuando existe refuerzo longitudinal, pero no posee refuerzo transversal; la cual se muestra a continuación en la Ecuación 1.

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} bd \quad (1)$$

Donde:

V_c : fuerza cortante (kgf/cm^2),

f'_c : resistencia a la compresión del hormigón (kgf/cm^2),

b : ancho de la viga (cm),

d : peralte efectivo de la viga (cm).

Se procederá a realizar ensayos aplicados a diferentes especímenes de muestras de hormigón en el cual se variará la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c), cuantía de refuerzo (ρ), se utilizará una relación a/d fija, donde “ a ” es la distancia entre la aplicación de la carga y el apoyo y “ d ” el peralte efectivo de la viga, y se utilizará el agregado de Pintag para la mezcla del hormigón.

En cuanto a la cuantía de refuerzo longitudinal fueron asignadas tres variantes, con una cuantía mínima ($\rho_{\text{mín}}$), una cuantía máxima ($\rho_{\text{máx}}$) y una cuantía promedio (ρ_{prom}). Para la cuantía mínima se utilizó la especificada en la sección 9.6, de la norma del ACI 318-19.

El mecanismo de ensayo a aplicarse se basa en el ensayo a flexión de una viga de hormigón colocando acero de refuerzo longitudinal, para obligar a que en la viga se produzca una falla por corte antes que una falla por flexión.

Mediante la obtención de los valores experimentales se realizarán gráficas representativas, de las que se obtendrá una ecuación lineal y un coeficiente de determinación (R^2), las mismas que serán comparadas con las gráficas de la ACI - ASCE 326 [12] y la ACI - ASCE 445 [13], las cuales muestran las ecuaciones representativas de la base de datos de las 194 vigas ensayadas y son la base fundamental de la actual fórmula simplificada (Ecuación 1) que presenta la norma ACI 318-19 [1].

2.4. Diseño del hormigón

El método utilizado para el diseño de las mezclas de hormigón fue el propuesto por la ASOCRETO [14], al ser el más difundido y utilizado en Ecuador, mediante este método se obtuvo las resistencias necesarias para la investigación de: 21 MPa, 24 MPa y 28 MPa.

Para este diseño se consideró tanto las características físicas de los agregados como contenido de agua y contenido de cemento, también se consideró los asentamientos en la mezcla y se realizó las respectivas correcciones de

humedad en los agregados y la corrección del peso unitario del concreto fresco, como se observa en la Figura 4, con el fin de verificar la correcta dosificación del hormigón.

Una vez ensayados todos los cilindros se logró alcanzar las resistencias de diseño esperadas, como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2: Resistencias de diseño a los 28 días.

Resistencia de diseño (MPa)	Resistencia a la compresión a los 28 días (MPa)		
	Obtenida	Norma	Obtenida/Norma
21	21,23	21	1,011
24	24,43	24	1,018
28	28,64	28	1,023

2.5. Ensayos de resistencia al corte del hormigón

Una vez verificadas las diferentes resistencias a la compresión del hormigón para 21 MPa, 24 MPa y 28 MPa, se procedió a la elaboración de 36 vigas de hormigón con inclusión de acero de refuerzo longitudinal, lo que le permitirá a la viga al momento del ensayo fallar por corte antes que por flexión. Este ensayo establece su procedimiento en la norma ASTM C78-02 [11].

3. Resultados y Discusión

Una correcta dosificación del hormigón depende principalmente de la caracterización de los agregados grueso y fino, las características físicas de un agregado definen la calidad y durabilidad de un hormigón.

De acuerdo a los resultados de los ensayos obtenidos en laboratorio se puede notar que se trabajó con agregados de buena calidad, ya que estos cumplen con las prescripciones normativas en cuanto a gradación, porcentaje de abrasión, impurezas orgánicas entre otras, indicándose en la Tabla 3 un resumen de sus propiedades.

En cuanto al agregado grueso, proveniente de Pintag, podemos observar en la Tabla 3 que el desgaste a la abrasión que presenta es del 28,4%, considerando que la norma exige un desgaste máximo del 50%, por ende, el agregado es de buena calidad.



Figura 4. Moldeado de los cilindros de hormigón y toma de la muestra de concreto fresco.

El tamaño de un agregado debe analizarse a fondo para un correcto diseño de la mezcla, para ello se realizó los respectivos ensayos granulométricos, los mismos que muestran un tamaño máximo nominal (TMN) de 12,5 mm (1/2 pulg.) y un tamaño máximo (TM) de 19 mm (3/4 pulg.)

El tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso, fue tomado en base a lo indicado en la ASOCRETO [14], considerando la dimensión de los moldes y de la previa colocación del acero de refuerzo para las vigas de hormigón, para así cumplir con los requerimientos mínimos establecidos, además de eliminar el exceso de vacíos al momento del vertido de la mezcla y mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 3. Resumen de las propiedades físicas de los agregados provenientes de Pintag.

Propiedades físicas	Unidad	Agregado grueso	Agregado fino
TM	mm	19	-
TMN	mm	12,5	-
Peso específico (SSS)	kgf/m ³	2395	2340,7
Peso unitario suelto	kgf/m ³	1159,58	1333,33
Peso unitario compactado	kgf/m ³	1234,35	1470,64
Módulo de finura	-	-	3,09
Desgaste abrasión	%	28,4	-
Absorción	%	4,16	4,76
Humedad	%	3,5	6

Una vez obtenidos todos los datos necesarios de los ensayos correspondientes para la realización de la mezcla, se procedió con el diseño de la misma, mediante el método propuesto por la ASOCRETO [14], a más de ello se realizaron correcciones a las mezclas de hormigón debido a que estas no cumplían con los asentamientos requeridos; las correcciones realizadas fueron por humedad de los agregados y peso unitario del concreto fresco para verificar una correcta dosificación de los hormigones de 21 MPa, 24 MPa y 28 MPa con valores de trabajabilidad comprendidos entre 8.5 a 9.5 cm. A continuación, en la Tabla 4 se presenta la dosificación correspondiente para cada resistencia.

Tabla 4. Dosificación para las distintas resistencias (f'c).

Resistencia a la compresión f'c (MPa)	Material	Peso por metro cúbico (kgf/m ³)	Relación al peso
21	Cemento	371	1,00
	Arena	912,86	2,46
	Grava	665,6	1,79
	Agua	208,57	0,56
24	Cemento	406	1,00
	Arena	883,94	2,18
	Ripio	665,6	1,64
	Agua	208,9	0,51
28	Cemento	458	1,00
	Arena	841,11	1,84
	Ripio	665,6	1,45
	Agua	209,41	0,46

Para la determinación del acero de refuerzo longitudinal a colocarse en las vigas de hormigón se utilizó las fórmulas establecidas en la NEC-15 de Hormigón Armado, para una cuantía mínima (ρ_{\min}), una cuantía máxima (ρ_{\max}) y una cuantía promedio (ρ_{prom}), como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Acero colocado en vigas.

Resistencia a la compresión f'c (MPa)	ρ	Cuantía requerida	Cuantía colocada	Acero colocado
21	ρ_{\min}	0,0033	0,00403	1Ø10 mm
	ρ_{\max}	0,0108	0,0116	2Ø12 mm
	ρ_{prom}	0,0071	0,0077	3Ø8 mm
24	ρ_{\min}	0,0033	0,00403	1Ø10 mm
	ρ_{\max}	0,0124	0,0142	1Ø8 mm 2Ø12 mm
	ρ_{prom}	0,0079	0,0081	2Ø10 mm
28	ρ_{\min}	0,0033	0,00403	1Ø10 mm
	ρ_{\max}	0,0145	0,0156	1Ø10 mm 2Ø12 mm
	ρ_{prom}	0,0089	0,0092	2Ø8 mm 1Ø10 mm

Donde:

ρ : cuantía de acero.

Archundia H. y Tena A. [15] mencionan a los mecanismos resistentes de las vigas sin refuerzo transversal al ser sometidas a un esfuerzo cortante, el mecanismo de arco, cuando: $1 \leq a/d \leq 2.5$, el mecanismo de viga, cuando: $2.5 < a/d < 5.6$ y cuando: $a/d \geq 5.6$ la falla es por flexión.

Por su parte Appa Rao G. e Injaganeri S. [16] indican que, las vigas de hormigón reforzado se clasifican en tres tipos dependiendo de su relación a/d, como: vigas profundas cuando: $0 < a/d \leq 1$, vigas cortas cuando: $1 < a/d \leq 2.5$ y vigas normales cuando $a/d > 2.5$.

Para el caso de los valores experimentales obtenidos en este estudio estos se encuentran en el mecanismo de arco, según Archundia H. y Tena A. [15], y en el mecanismo de vigas profundas según Appa Rao G. e Injaganeri S. [16]; ya que el valor de la relación a/d es de 0.98, donde “a” es la distancia entre la aplicación de la carga y el apoyo y “d” el peralte efectivo de la viga.

El valor de “a” será constante debido a las dimensiones de las vigas y facilidad de colocación en la máquina de ensayo en laboratorio, dicho valor será de 12,83 cm; por otro lado, el valor de “d” también se mantendrá constante y será de 13 cm.

Después de verificarse la correcta dosificación del hormigón y cumplir con la

resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días, definirse los parámetros “a” y “d” y determinar el acero a colocarse en las vigas, se procedió con la fundición de las 36 vigas de hormigón, las cuales posteriormente fueron sometidas al ensayo de la resistencia a la flexión del hormigón, ASTM C78-02 [11], donde la carga se aplicó en los tercios medios de la viga y se obtuvieron los valores del cortante último (Vu).

Basado en los resultados obtenidos, se presenta en la Tabla 6, la relación existente entre el cortante último experimental y el cortante último obtenido por medio de la Ecuación 1, presentada en la ACI 318-19 [1]; tomando en cuenta la cuantía mínima (ρ_{\min}), la cuantía máxima (ρ_{\max}), la cuantía promedio (ρ_{prom}) y las tres diferentes resistencias a la compresión del hormigón ($f'c$).

Para el caso de la resistencia a la compresión de 21 MPa y cuantía máxima (ρ_{\max}), la relación Vu/Vc es 5.20, para la misma resistencia a la compresión y cuantía promedio (ρ_{prom}), la relación Vu/Vc es 4.82, y de igual manera para la misma resistencia a la compresión y cuantía mínima (ρ_{\min}), la relación Vu/Vc es 3.78; por ende, al producirse la falla por corte en la viga, el corte último para la cuantía máxima (ρ_{\max}) sería 5.20, mientras que para la cuantía promedio (ρ_{prom}) sería 4.82 y para la cuantía mínima (ρ_{\min}) sería 3.78 veces mayor que la resistencia al corte del hormigón calculada con la fórmula del ACI 318-19 [1]. Lo mismo ocurre para las otras resistencias medidas.

Tabla 6. Cortante experimental vs cortante empírico en las vigas para los diferentes ($f'c$).

$f'c$ (kgf/cm ²)	ρ	Cuantía	Vu (kgf)	Vc (kgf)	Vu/Vc	Mn (kgf-cm)
210	ρ_{\max}	0,0116	7786,53	1497,68	5,20	99901,19
	ρ_{prom}	0,0071	7219,78	1497,68	4,82	92629,80
	ρ_{\min}	0,0040	5655,46	1497,68	3,78	72559,55
240	ρ_{\max}	0,0142	8121,40	1601,09	5,07	104197,57
	ρ_{prom}	0,0079	7654,17	1601,09	4,78	98203,05
	ρ_{\min}	0,0040	6048,04	1601,09	3,78	77596,41
280	ρ_{\max}	0,0156	8457,34	1729,38	4,89	108507,68
	ρ_{prom}	0,0089	7959,98	1729,38	4,60	102126,57
	ρ_{\min}	0,0040	6379,45	1729,38	3,69	81848,31

Donde:

$f'c$: resistencia a la compresión del hormigón (kgf/cm²),

ρ : cuantía de acero,

Vu: fuerza cortante experimental (kgf),

Vc: fuerza cortante aplicando la ecuación ACI 318-19, (Ecuación 1) (kgf),

Vu/Vc: relación existente entre el cortante último experimental y el cortante último empírico,

Mn: momento nominal (kgf-cm).

Por otra parte, se realizó un análisis gráfico de los valores experimentales obtenidos en laboratorio, en función de las gráficas y ecuaciones generales propuestas por los Comités de la ACI-ASCE 326 [12] y ACI-ASCE 445 [13], de las cuales se deriva la actual fórmula del ACI 318-19 (Ecuación 1); para este caso se ha revisado la normativa anterior de la ACI 318-14 [17], en la cual se mencionan las fórmulas de la sección 22.5.5.1 para calcular el esfuerzo cortante último, las mismas que se encuentran en función de la resistencia a la compresión del hormigón ($f'c$), cuantía de acero longitudinal (ρ), peralte de la viga (d) y la relación entre el cortante último (Vu) y el momento nominal (Mn), variables importantes para la comparación de los valores experimentales, ya que estas ecuaciones se fundamentan en las experimentaciones iniciales de vigas con refuerzo longitudinal.

El Comité de la ACI-ASCE 326 [12], por su parte presenta la gráfica en la cual se puede observar que los valores experimentales obtenidos por el ACI se han ajustado a la ecuación presente en la norma del ACI 318-14 (trazo rosado), por otro lado, los valores experimentales obtenidos en este estudio, se alejan de la línea representada por la ecuación de la ACI, estos están representados de color azul como se aprecia en la Figura 5.

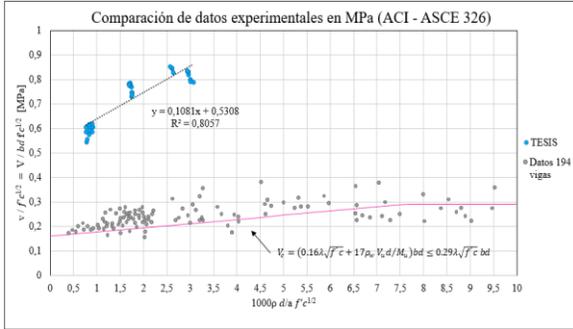


Figura 5. Comparación de los datos experimentales vs. los 194 datos de las vigas de prueba de la ACI-ASCE326.

En cuanto al Comité de la ACI-ASCE 445 [13], se puede observar que al igual que en la ACI-ASCE 326, también los valores experimentales de laboratorio (puntos azules) se ubican por encima de la ecuación propuesta por el ACI 318-14. Se incluye en la gráfica una línea horizontal, la cual se corresponde con la versión simplificada de resistencia al corte del hormigón sin considerar el refuerzo longitudinal, como se muestra en la Figura 6.

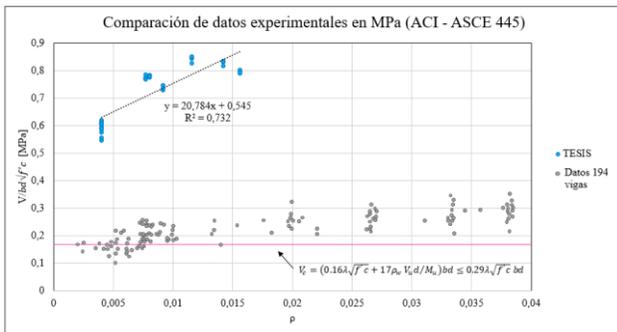


Figura 6. Comparación de los datos experimentales vs. los 194 datos de las vigas de prueba de la ACI-ASCE 445.

En el Anexo 1, se aprecian las gráficas de los valores experimentales obtenidos en laboratorio, en función de las gráficas y ecuaciones generales propuestas por los Comités de la ACI-ASCE 326 y ACI-ASCE 445, en unidades de psi (lb/pulg²).

Además de ello, como resultado de este análisis se obtuvo ecuaciones y coeficientes de correlación para cada gráfica, como se detalla en la Tabla 7, en cuanto a los valores del coeficiente de determinación (R^2), estos son bastante próximos a 1. Según investigaciones sobre R^2 [18] indican que la escala de valores entre 0,51-0,75 va de moderada y fuerte, y los valores entre 0.76-1

muestran una correlación que va de fuerte a perfecta entre las variables en cuestión de análisis.

Tabla 7. Ecuaciones y coeficientes R^2 para las gráficas.

Fig.	Gráficas	Ecuación	R^2
5	ACI-ASCE 326	$y=0.1081x + 0.5308$	0.8057
6	ACI-ASCE 445	$y=20.784x + 0.545$	0.732

Appa Rao G. e Injaganeri S. [16] en su investigación analizaron el efecto del peralte efectivo “d” en las vigas de hormigón, y proponen modelos de análisis en función de la resistencia a la compresión del hormigón, la cuantía de acero y de la relación a/d, a través de distintas ecuaciones presentadas por diversos autores.

Para el estudio en cuestión, se tomó el análisis en base a la Ecuación 2, Ecuación 3 y Ecuación 4.

Modelo Propuesto por ACI 318-05:

$$V_c = \frac{1}{7}(\sqrt{f'c} + 120\rho\frac{d}{a}) \leq 0.3\sqrt{f'c}, MPa \quad (2)$$

$$\frac{V_u d}{M_u} = \frac{a}{d} \leq 1$$

Modelo Propuesto por Appa Rao G. e Injaganeri S.:

$$V_u = \left(0.56 + \frac{4}{(a/d)^{3/2}}\right) [f'c^{1/3} \rho^{1/2} d^{-1/4}], MPa \quad (3)$$

Modelo Propuesto por Bazant y Kim:

$$V_u = \frac{10\rho^{1/3}}{\sqrt{1 + \frac{d}{25d_a}}} \left(0.083\sqrt{f'c} + 20.69 \sqrt{\frac{\rho}{(a/d)^5}}\right), MPa \quad (4)$$

Una vez identificadas las ecuaciones, se procedió a determinar el cortante último (V_u) correspondiente a cada ecuación con los valores experimentales de laboratorio y se realizó las gráficas que se detallan en el Anexo 2 y el Anexo 3, en las que se realizó la normalización de los valores experimentales en función de la raíz cúbica de la resistencia a la compresión ($f^{1/3}$) y de la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión ($f^{1/2}$) respectivamente.

Dicha normalización se la realizó a fin de comparar los valores experimentales derivados del presente estudio y las ecuaciones propuestas por los investigadores previamente citados.

Para los valores de resistencia al corte del hormigón normalizados por la raíz cuadrada o cúbica al aplicar las ecuaciones de Appa Rao, Injaganeri y Bazant, Kim en comparación con la indicada por el ACI; se destaca que la del ACI se ubica por debajo de las propuestas por los investigadores citados y los valores experimentales obtenidos en este estudio se aproximan a los valores indicados por las ecuaciones de Appa Rao, Injaganeri y Bazant, Kim tomando en cuenta las distintas resistencias a la compresión y porcentajes de acero longitudinales.

Por otro lado, se realizó la comparación de la relación a/d con distintos valores, cuando $a/d = 1$, $a/d = 2.5$ y $a/d = 4$, utilizando las ecuaciones propuestas por Archundia H. y Tena A. [15].

Se destaca que el ACI en la formulación de la resistencia al corte del hormigón, se limita a que el valor de a/d no supere el valor de 1, esto hace que la línea se ubique a una altura constante como se muestra en el Anexo 4.

Por otra parte, las ecuaciones propuestas por Appa Rao, Injaganeri y Bazant, Kim son sensibles o varían dependiendo de la relación que tenga el valor de a/d .

Para valores de a/d iguales a 1, caso que se corresponde con la data experimental en esta investigación, los resultados se aproximan a la ecuación indicada por Appa Rao, Injaganeri y Bazant, Kim y se ubican por encima de la ecuación indicada por el ACI.

En la medida en que los valores de a/d crecen en las formulaciones de Appa Rao G. e Injaganeri S. [16], las curvas se acercan a la propuesta por el ACI, lo cual sugiere que posiblemente las vigas ensayadas o datos experimentales del ACI fueron realizados con vigas cuya relación a/d superaba el valor de 2.5 en correspondencia con el análisis de sensibilidad realizado en el valor de a/d .

Estas comparaciones se realizan para conocer y diferenciar el tipo de vigas características que

se utilizaron para la base de datos de 194 vigas de la gráfica propuesta por ACI-ASCE 326; en la misma que se evidenció que, para las relaciones $a/d > 2.5$, las curvas de Appa Rao, Injaganeri y Bazant, Kim empiezan a ajustarse a la del ACI, como se aprecia en el Anexo 4, en donde se ha tomado como ejemplo la resistencia a la compresión del hormigón de 21, 24 y 28 MPa, para la cuantía promedio (ρ_{prom}); lo que nos muestra que para dichos ensayos de las 194 vigas se utilizaron vigas de dimensiones con relación a/d muy superiores a 1.

4. Conclusiones

Las propiedades físicas de los materiales obtenidos de la cantera de Pintag, tanto del agregado grueso como del agregado fino, son de buena calidad, cumpliendo con las prescripciones normativas, lo que permitió elaborar dosificaciones siguiendo la normativa correspondiente.

Se recomienda una correcta realización de los ensayos en laboratorio a los agregados, para asegurar una correcta caracterización de los mismos y una mezcla adecuada para conseguir el asentamiento y la resistencia a la compresión del hormigón deseado; en el caso de no conseguir el asentamiento deseado se realizarán las respectivas correcciones de humedad y se tomará en cuenta del peso unitario del concreto fresco medido en laboratorio

Con el ensayo de compresión del hormigón que se les realizó a los testigos cilíndricos de hormigón, se logró corroborar las resistencias deseadas a los 7, 14 y 28 días, después de realizarse los respectivos ajustes en las mezclas de prueba.

Se recomienda al momento de la toma de los testigos cilíndricos, moldearse tres o más especímenes por cada edad de ensayo.

Para la colocación del acero de refuerzo longitudinal en los moldes para las vigas de hormigón, se procuró mantener el recubrimiento mínimo establecido de 2 cm para esta investigación y el espaciado entre varillas requerido, de tal modo que al realizar el vertido de

la mezcla de hormigón en los moldes esta tenga un correcto acomodo al momento del varillado, además de eliminar exceso de vacíos.

En las vigas de hormigón con refuerzo longitudinal, la resistencia al cortante último disminuye al aumentar la relación a/d, incrementa al incrementar la cuantía de refuerzo (ρ), e incrementa con el incremento de la resistencia a la compresión del hormigón (f'_c); esto se le atribuye al desarrollo de los mecanismos de arco con valores bajos de a/d, que para la presente investigación a/d es de 0.98.

Los valores de resistencia al corte obtenidos a través de la fórmula propuesta por el ACI 318-14, fueron menores con respecto a los obtenidos mediante la data experimental deriva del presente estudio.

Se destaca que la formulación actual de resistencia al corte del ACI 318-19 es bastante simplificada ya que no incluye variables importantes como el momento nominal, el cortante último y la cuantía de acero de refuerzo, por tal motivo se recurrió a utilizar la fórmula general presentada en la anterior norma del ACI 318-14, la cual si incluye estas importantes variables para el cálculo del esfuerzo cortante último; esto no significa que la fórmula propuesta en ACI 318-19 no tenga validez, por el contrario esta fórmula facilita la labor diaria del diseño de vigas de hormigón.

Se determinaron las ecuaciones que relacionan la resistencia al corte del hormigón normalizada por la resistencia a la compresión en función de: $\rho \cdot d/a$, $f'_c^{1/2}$ y ρ , cuyas ecuaciones son $y=0.1081x + 0.5308$ e $y=20.784x + 0.545$ con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.80 y de 0.73 respectivamente, los valores de R^2 que se ubican en el rango de fuerte a perfecta.

Respecto a los autores Appa Rao, Injaganeri y Bazant, Kim; se distingue que a mayor relación a/d para una misma resistencia a la compresión del hormigón (f'_c), estas curvas tienden a ajustarse de mejor forma a la línea del ACI, lo que indica que existe una influencia importante del valor de a/d en la resistencia al corte normalizada del hormigón.

Vigas ensayadas en este estudio con valores de a/d próximos a 1 generaron resistencias al corte del hormigón muy próximas a la propuesta por Appa Rao, Injaganeri y estos valores difieren de la formulada por el ACI.

Las ecuaciones formuladas por los autores Appa Rao G. e Injaganeri S., indican que vigas con valores de a/d mayores a 2.5 producen curvas que tienden a ser similares a las del ACI.

Se sugiere ensayar vigas variando la relación de a/d a fin de compararlas con el ACI y obtener una ecuación que contemple este efecto en la cuantificación de la resistencia al corte del hormigón.

Para el caso estudiado en el presente trabajo de investigación donde la relación de a/d es próximo a 1 los valores de resistencia al corte del hormigón superan entre 3 y 5 veces los valores indicados en la norma del ACI.

En todos los casos ensayados se destaca que la viga falla por corte antes que por flexión. La falla por corte posee una inclinación próxima a los 45°, inicia en el apoyo y alcanza el punto de aplicación de la carga puntual.

Referencias

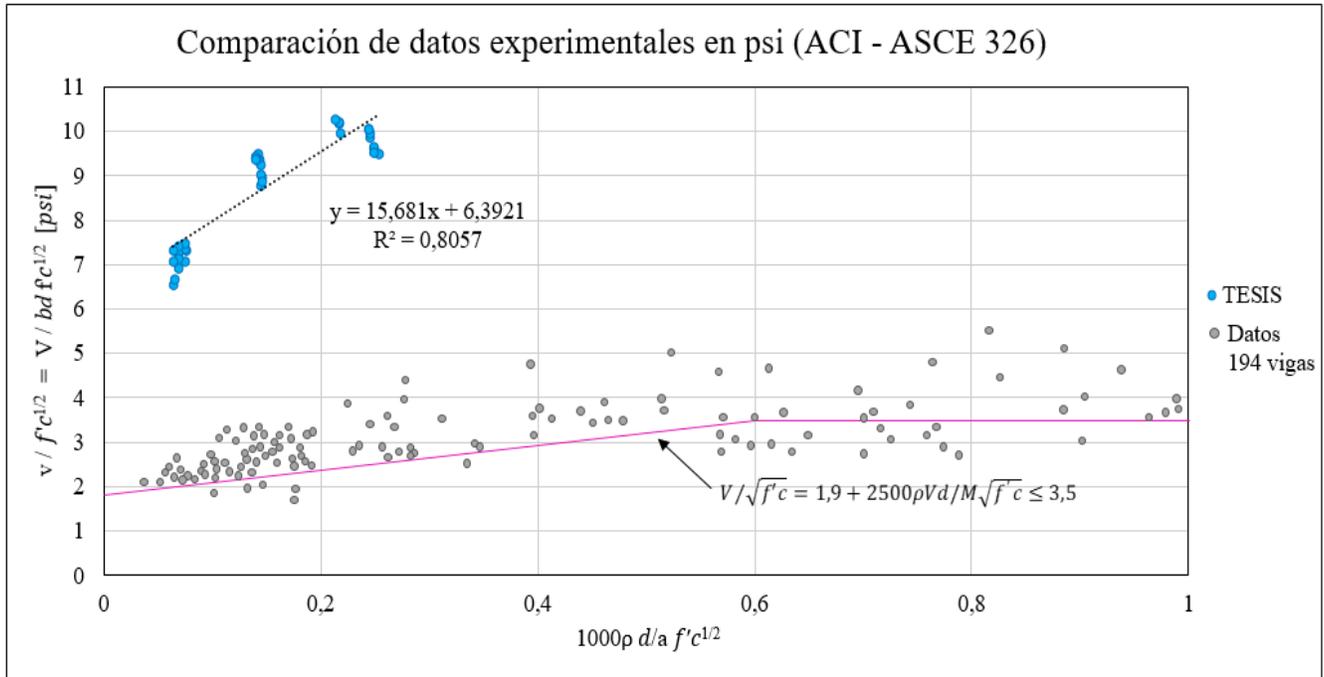
- [1] ACI 318-19, “Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural” American Concrete Institute, Farmington Hills, U.S.A, 2019.
- [2] ASTM C702/C702M – 18, Práctica estándar para reducir muestras de agregado a tamaño de prueba, ASTM International, 2018.
- [3] ASTM C136/C136M – 19, Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos, ASTM International, 2019.
- [4] ASTM C128-04a, Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos, ASTM International, 2004.
- [5] ASTM C127-04, Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica),

- y la absorción de agregados gruesos, ASTM International, 2004.
- [6] ASTM C29/C29M-17a, Método de prueba estándar para determinar la densidad aparente ("peso unitario") y vacíos en el agregado, ASTM Internacional, 2017.
- [7] ASTM C131M-14, Resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles, ASTM Internacional, 2014.
- [8] ASTM C40-04, Método de ensayo normalizado para la detección de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto, ASTM Internacional, 2004.
- [9] ASTM C566-97(2004), Estándar Método de ensayo normalizado para medir el contenido total de humedad en agregados mediante secado, ASTM Internacional, 2004.
- [10] ASTM C39/C39M-17, Método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, ASTM Internacional, 2017.
- [11] ASTM C78-02. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto (Utilizando viga simple con carga en los tercios del claro), ASTM International, 2002.
- [12] Report of ACI-ASCE Committee 326, "Shear and Diagonal Tension" ACI Structural Journal, Title no 59, september 1962.
- [13] Report of ACI-ASCE Committee 445, "Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete", ACI Structural Journal, Chapter 4, Members without transverse reinforcement, p. 445R-25, november 1999.
- [14] Tecnología del Concreto, Tomo 1 - Materiales, propiedades y diseño de mezclas, ASOCRETO (Asociación Colombiana de Productores de Concreto), Nomos Impresores, Colombia, 2010.
- [15] Archundia Aranda, Hans I., y Tena Colunga, Arturo, "Sección crítica, esbeltez y regiones B-D para diseño a cortante de trabes de concreto reforzado", Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. México D.F., 2015. Tomado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-30112015000200001&lng=es&tlng=es
- [16] Appa Rao G. and Injaganeri S. S. "Evaluation of size dependent design shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement", Indian Academy of Sciences, Sadhana, Vol. 36, Part 3, June 2011.
- [17] ACI 318-14, "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural" American Concrete Institute, Farmington Hills, U.S.A, 2014.
- [18] Martínez R., Tuya L., Martínez M., Pérez A. y Cánovas A., "El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización", Revista Habanera de Ciencias Médicas, ISCM-H, 2009, Tomado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&lng=es&tlng=es.

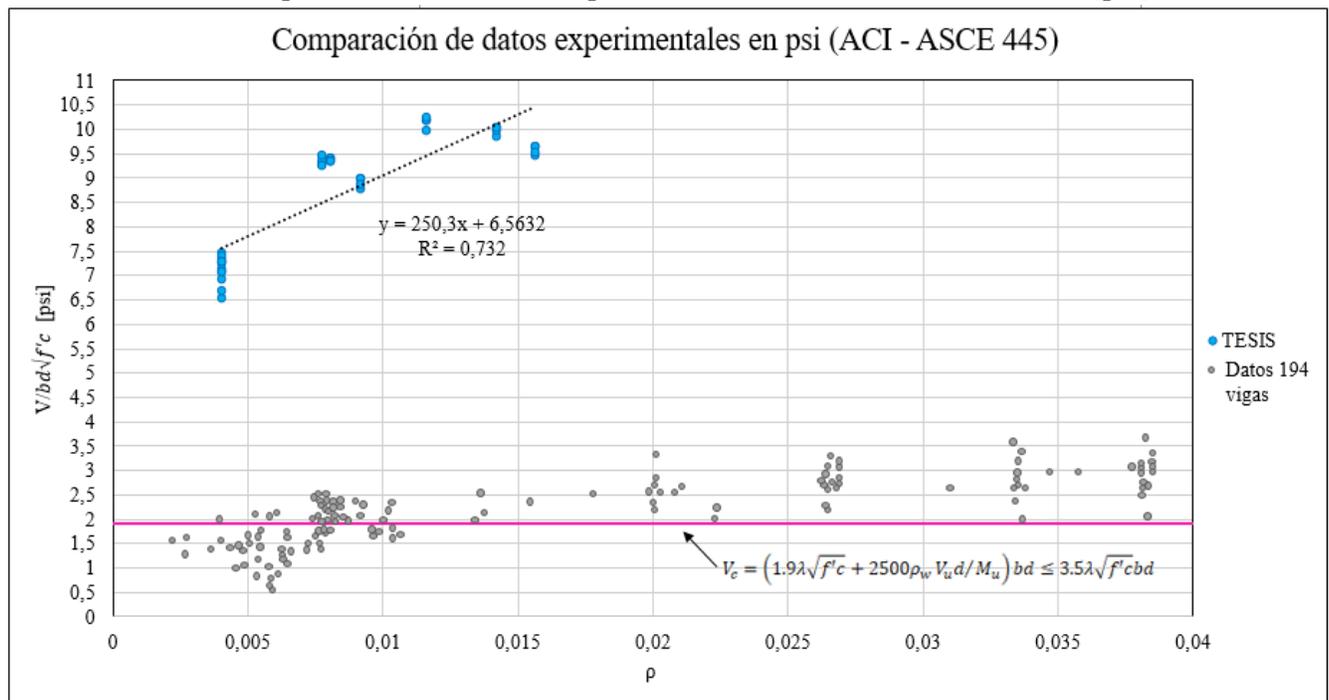
ANEXOS

Anexo 1

- Gráfica de la comparación de los datos experimentales con la ACI-ASCE 326 en [psi].

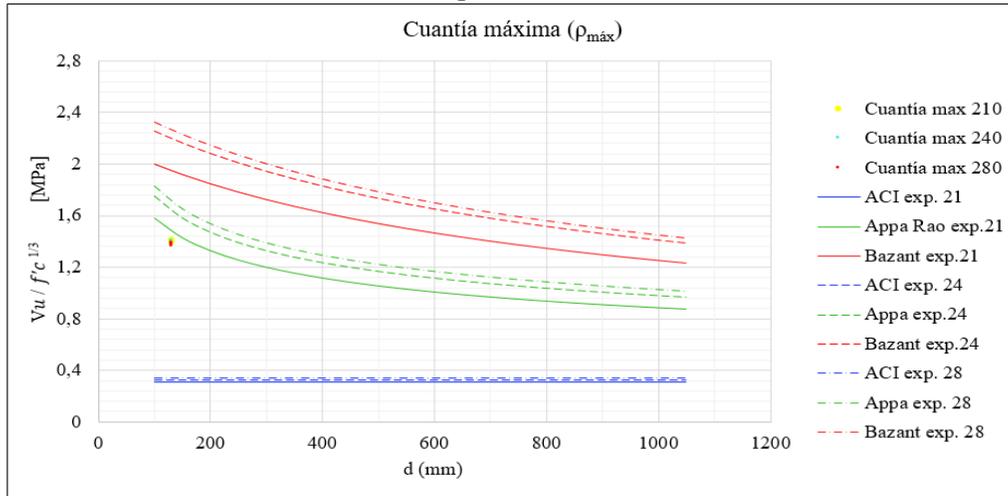


- Gráfica de la comparación de los datos experimentales con la ACI-ASCE 445 en [psi].

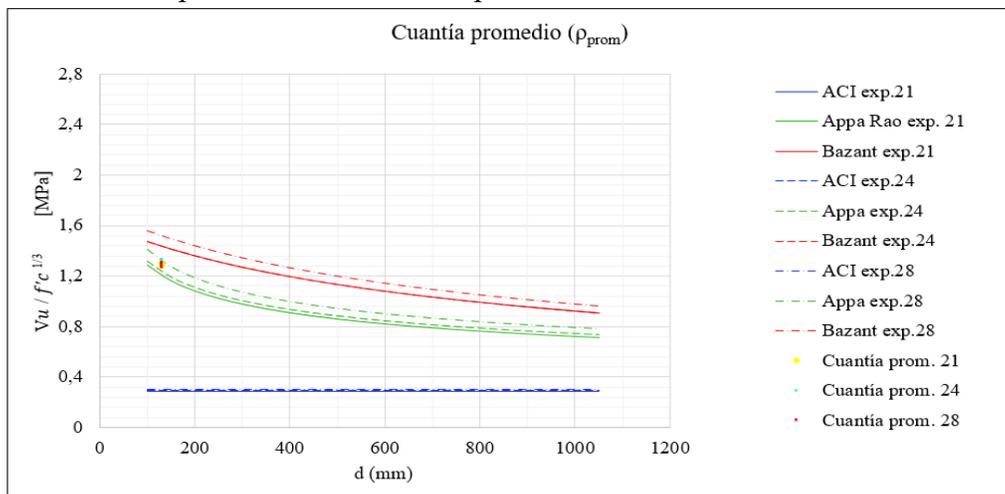


Anexo 2

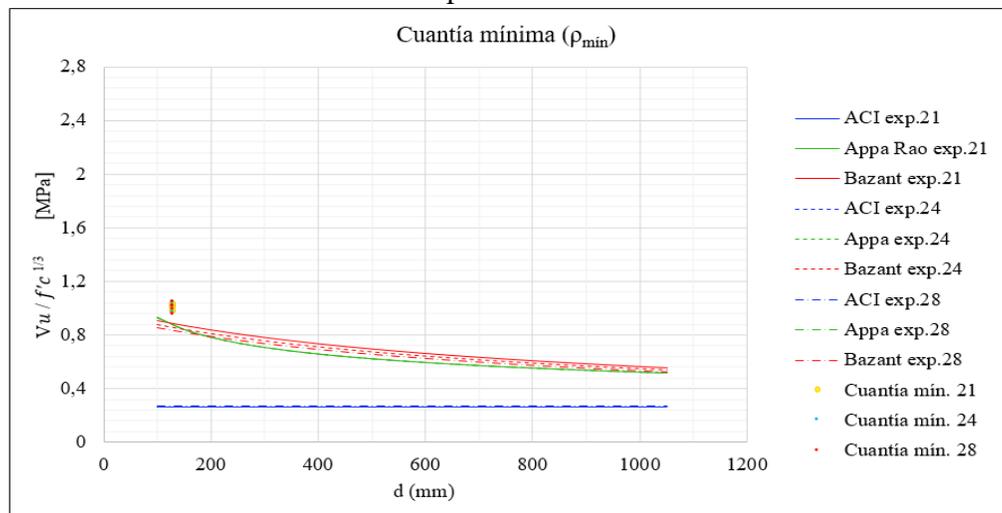
- Gráfica de la cuantía máxima normalizada para $f_c^{1/3}$.



- Gráfica de la cuantía promedio normalizada para $f_c^{1/3}$.

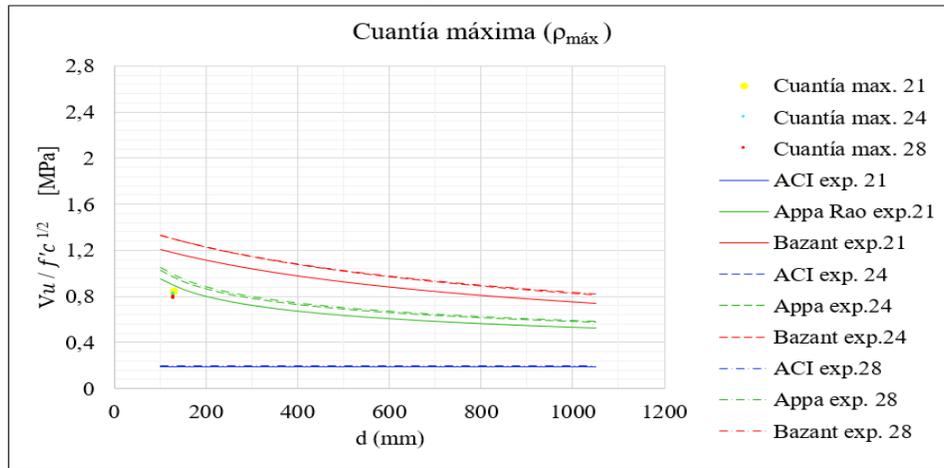


- Gráfica de la cuantía mínima normalizada para $f_c^{1/3}$.

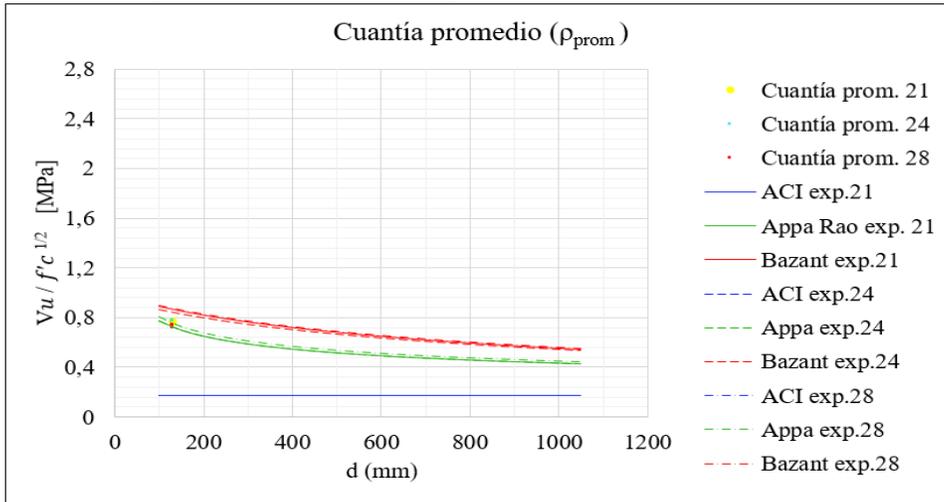


Anexo 3

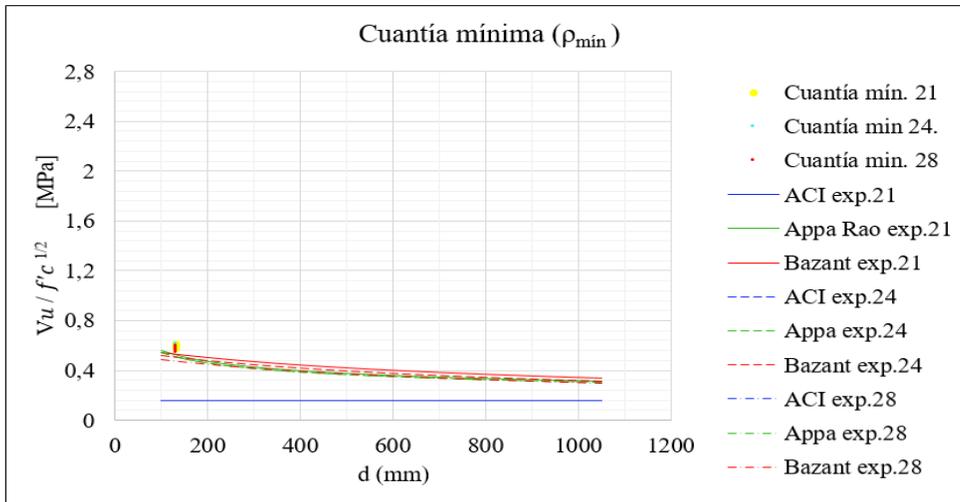
- Gráfica de la cuantía máxima normalizada para $f_c^{1/2}$.



- Gráfica de la cuantía promedio normalizada para $f_c^{1/2}$.

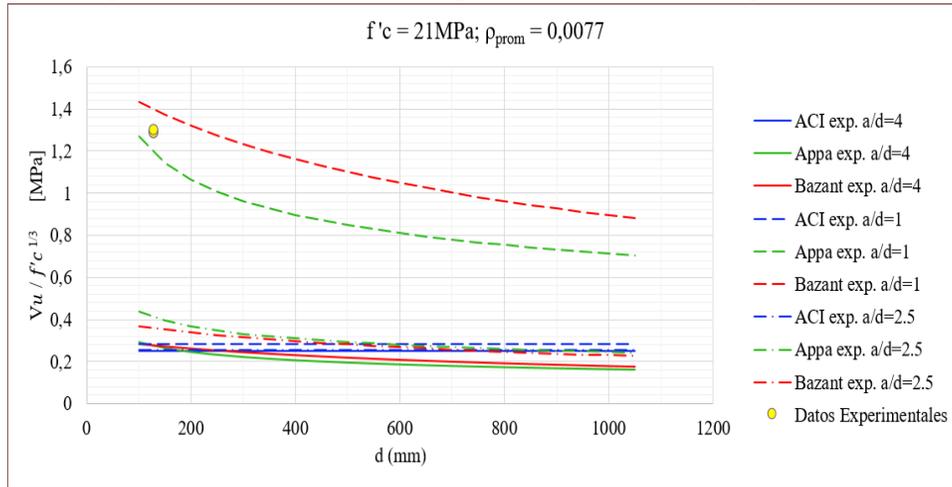


- Gráfica de la cuantía mínima normalizada para $f_c^{1/2}$.

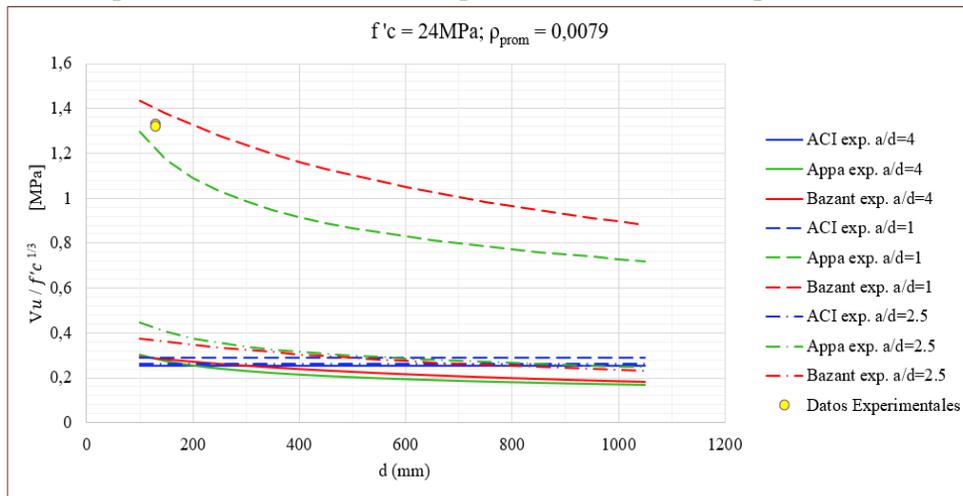


Anexo 4

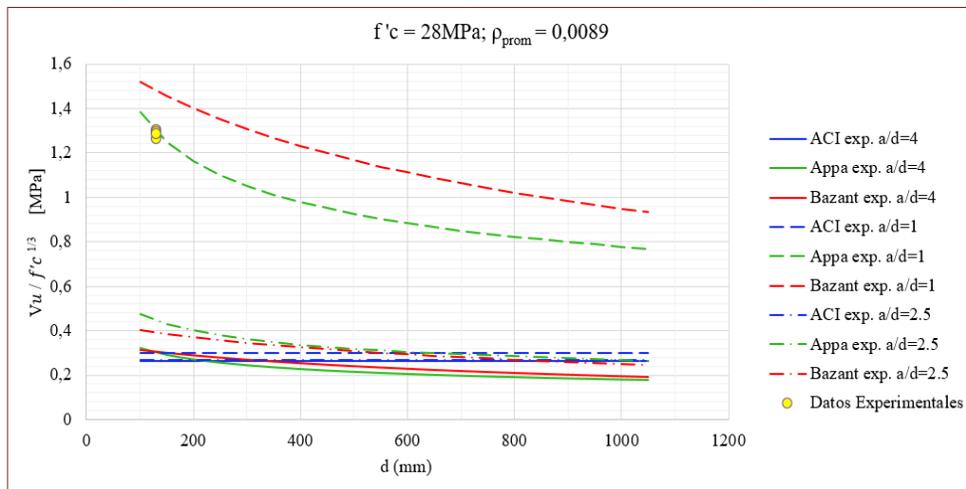
- Gráfica de la comparación de las ecuaciones para cada relación a/d, para $f'c=21\text{MPa}$.



- Gráfica de la comparación de las ecuaciones para cada relación a/d, para $f'c=24\text{MPa}$.



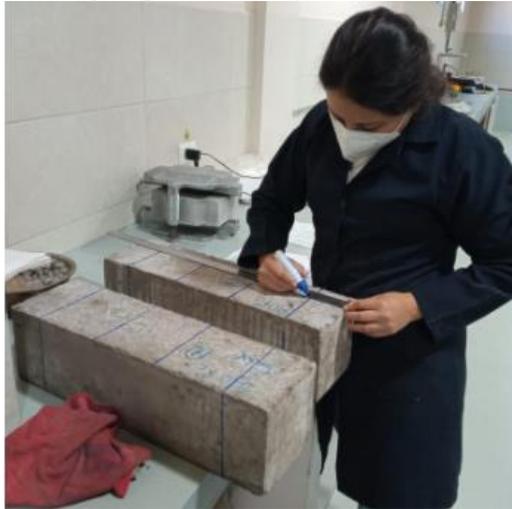
- Gráfica de la comparación de las ecuaciones para cada relación a/d, para $f'c=28\text{MPa}$.



Anexo 5.

Anexo Fotográfico

- Preparación de las vigas de hormigón para el ensayo de flexión, a la edad de 28 días.



- Ensayo a corte viga con $f'c = 28\text{MPa}$ y ρ_{prom} , a la edad de 28 días.



- Ensayo a corte viga con $f'c = 24\text{MPa}$ y ρ_{prom} , a la edad de 28 días.



- Ensayo a corte viga con $f'c = 21\text{MPa}$ y ρ_{prom} , a la edad de 28 días.

