



12-14 de Noviembre del 2012
Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa

PROPIEDADES ELÁSTICAS DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO

**D.C. Gámez García¹, S. Apodaca García¹, J.R. Orduño Apodaca¹, J.M. Gómez Soberón²,
S.P. Arredondo Rea¹, J.L. Almaral Sánchez¹, R. Corral Higuera^{1,*}**

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, Fuente de Poseidón y Ángel Flores s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México, dianagamezgarcia@gmail.com.

²Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Construcciones Arquitectónicas II, Avenida Gregorio Marañón 44-50, Z.C. 08028, Barcelona, España.

RESUMEN

El presente trabajo es acerca de reciclar los residuos de demolición provenientes de concreto hidráulico de pavimento e incluirlos de nuevo en el ciclo de vida de los materiales en la construcción, como agregados reciclados (AR), gruesos y finos. Se ha planteado la sustitución del 20%, 30%, 60% y 100% de AR en el concreto, para evaluar principalmente sus propiedades elásticas. La técnica utilizada fue Frecuencia de Resonancia por Impacto (FRI), el cual es un método muy eficiente que permite conocer el módulo de Young, el Módulo de rigidez y la relación de Poisson a las distintas edades de curado (por su ventaja de ser no destructivo). También se evaluaron propiedades mecánicas, como resistencia a compresión e índice de rebote.

Palabras clave: Agregados Reciclados, Comportamiento elástico, Concreto Reciclado, Frecuencia de Resonancia por Impacto, Sustentabilidad.

ABSTRACT

The aim of this study is to recycle demolition waste of hydraulic concrete pavement and include us again in the life cycle of building materials, such as recycled aggregates (RA), coarse and fine. It has been suggested that substitution of 20%, 30%, 60% and 100% of RA in concrete, primarily to evaluate their elastic properties and how they affect the structural behavior of recycled concrete. The technique used was Impact Resonant Frequency, which is a very efficient method that allows to know the Young's modulus, the stiffness modulus and Poisson's ratio at different curing ages. At the same time mechanical properties were evaluated, as resistance to compression and rebound number through a compression test and by a hammer, respectively.

Key words: Elastic Behavior, Recycled Aggregates, Recycled Concrete, Resonant Frequency Impact, Sustainability.

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción contribuye de manera importante a la contaminación atmosférica y al deterioro ambiental. Las dificultades en la eliminación de los residuos de construcción y demolición del concreto, junto a la escasez de los agregados vírgenes han llevado a una necesidad concreta de reciclar los Residuos de construcción y demolición (RCD) como agregado en el concreto fresco^{1,2}.

Por mencionar algunos ejemplos globales, tal solo en China, según estadísticas, el consumo de cemento es 820 millones de toneladas y representa el 55% de todo el mundo². Por otra parte la producción de concreto con agregados reciclados procedentes de residuos de concreto estructural es aún poco frecuente en España. La nueva norma española EHE08 contiene un apéndice que presenta varias recomendaciones destinadas a introducir la sustitución de los recursos naturales por AGR hasta en un 20%³. En Italia, el uso de CR hasta con un 30% de sustitución en lugar de agregados naturales (AN) es admitido para los concretos que se producen con clase de resistencia C30/37 desde julio de 2009. Sin embargo, en la normativa italiana no se indica ninguna predicción del módulo de elasticidad y la contracción por secado del ACR⁴. Aún con las numerosas investigaciones que se han realizado, sigue siendo necesario el estudio que cumpla con todas las áreas que competen a las aplicaciones del concreto y a la procedencia de sus agregados, como por ejemplo para uso estructural.

El módulo de elasticidad es un parámetro sumamente importante que refleja la capacidad del concreto de deformarse mecánicamente, dichos conocimientos son útiles en la prevención de deformaciones excesivas, proveyendo de servicio y proporcionando el mejor diseño costo-beneficio⁵. El módulo de elasticidad dinámico (E_d) y el estático (E_c) son cercanos cuando las mediciones se toman por debajo de $0,4F'_c$, ya que la relación esfuerzo-deformación exhibe un comportamiento lineal en ese intervalo⁶, sin embargo a pesar de su cercanía en este intervalo, el E_d resulta ser mayor que el E_c ^{6,7,8}, esto se puede atribuir a la presencia del esfuerzo aplicado en la determinación del módulo de elasticidad estático, que da como resultado micro grietas que dispersan en el concreto⁶.

Los ensayos no destructivos proporcionan un conjunto de resultados interesantes por sí mismos y para su contrastación en la estimación de otros parámetros del material⁹. La evaluación directa del módulo de elasticidad estático de acuerdo con la norma ASTM C469 es complicada e implica un procedimiento que consume tiempo durante el endurecimiento del concreto. Las diferencias en el contenido de agregado grueso, agregado máximo de tamaño y el comportamiento reológico de AR pueden afectar el comportamiento esfuerzo-deformación¹⁰. Comparando el método de resonancia por impacto con el método de pulso ultrasónico, constatamos que el modo dinámico (acústico) estima con mayor precisión la deformabilidad del material que el pulso ultrasónico, dado que las longitudes de onda generadas por la perturbación son muy superiores a las discontinuidades, lo que minimiza el efecto de no homogeneidad del material estudiado⁹, por lo que los ensayos no destructivos proveen de ventajas importantes al momento de analizar el comportamiento elástico del concreto, además debido a su naturaleza no destructiva, se requiere la utilización de menor cantidad de probetas, por lo que concuerda con el fin sustentable del concreto reciclado.

Bajo la necesidad inminente de formar parte del ciclo de la vida de los materiales de construcción, resultados de investigaciones revelan que es seguro y factible de aplicar AR como material estructural en la ingeniería civil, sin embargo es necesario promover algunas áreas para el uso seguro y económico del ACR². El concreto reciclado (CR) ofrece una alternativa de solución a los problemas de sostenibilidad que presenta la industria de la construcción, hablando del consumo de recursos naturales y de los residuos de construcción y demolición que se generan, así como también del ahorro de energía¹. Si bien, en los últimos años el CR ha sido un tema de arduo estudio, aún es necesario que se siga desarrollando conocimiento y tecnología que ayude a comprender de forma más amplia el desempeño de éste^{11,12}.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento elástico y mecánico del CR con sustituciones de agregados gruesos y finos reciclados (AGR, AFR). Los AR pueden contribuir al decremento del comportamiento elástico y mecánico del CR conforme aumente su contenido.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se elaboraron 10 tipos de mezclas con una relación agua/cemento de 0.5 en una revolvedora de concreto. De las cuales cuatro se elaboraron con AGR, cuatro con AFR, una con 100% agregado natural (AN) y una más 100% AR (tanto fino, como grueso). Los porcentajes de sustitución fueron de 20%, 30%, 60% y 100%. Después de elaboradas las mezclas fueron vertidas en moldes: una viga de 50 x 15 x 15 cm para ensayos no destructivos a los 7, 28, y 90 días de curado y 3 cilindros de $\phi 10 \times 20$ cm para ensayos destructivos a los 28 días¹³. Las proporciones de las mezclas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Proporciones de las mezclas de concreto reciclado y concreto convencional.

Material (kg)	Identificación de las mezclas										Total
	N	GR-20	GR-30	GR-60	GR-100	FR-20	FR-30	FR-60	FR-100	R	
Agua	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06	50.61
Grava nat	30.37	24.29	21.26	12.15	0	30.37	30.37	30.37	30.37	0	209.52
Grava rec	0	6.07	9.11	18.22	30.37	0	0	0	0	30.37	94.13
Arena nat	20.24	20.24	20.24	20.24	20.24	16.19	14.17	8.1	0	0	139.68
Arena rec	0	0	0	0	0	4.05	6.07	12.15	20.24	20.24	62.75
Cemento	10.12	10.12	10.12	10.12	10.12	10.12	10.12	10.12	10.12	10.12	101.22

Materiales

El agregado de concreto reciclado (ACR), fino y grueso, proviene de la trituración de pavimento de concreto de desecho (Concreto de origen CO). Los AN fueron de canto rodado (grueso) y arena silíceo (fino) de río de la localidad; en la Tabla 2 se muestran sus propiedades físicas. El CO presentó una densidad de 2.36 kg/cm^3 , porosidad de 17.87%, índice de rebote de 28, y absorción de 6.91%.

Tabla 2. Características físicas de los agregados.

	Densidad (g/cm^3)	Absorción %	Módulo de finura	Tamaño máximo
AGN	2.56	1.19	-	25.4
AFN	2.59	1.88	2.53	4.76
AGR	2.38	6.27	-	25.4
AFR	2.28	11.86	3.38	4.76

La granulometría de los agregados finos naturales y reciclados, se ajustó a los estándares establecidos en ASTM C33¹⁴, mientras que la de los agregados gruesos se inclinó a partículas de mayor tamaño por ser la curva utilizada por las concretas, como se muestra en la figura 1a y 1b.

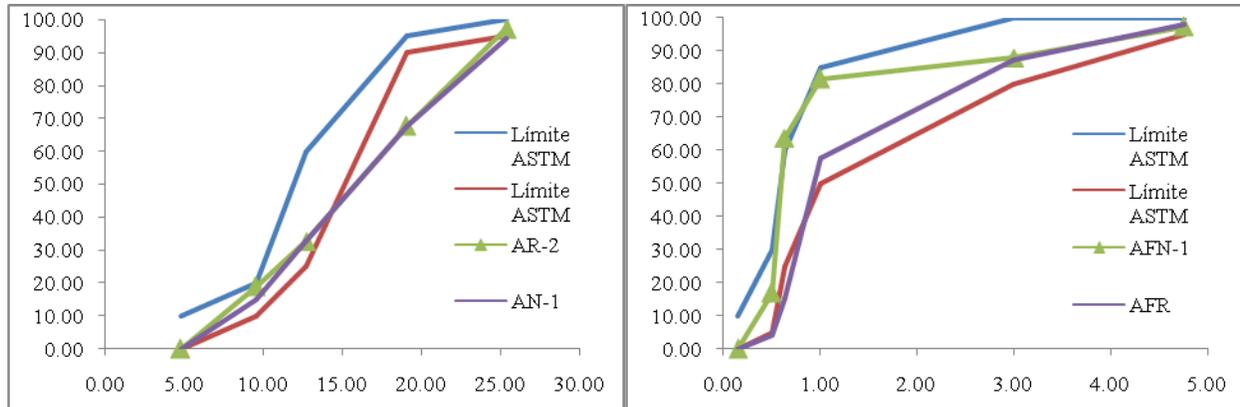


Figura 1: curvas granulométricas del concreto con a) AGR y b) AFR

Método

Después de recolectar el CO proveniente de demolición de pavimento, se procedió a su caracterización, evaluándole el índice de rebote (IR) a partir del ensayo no destructivo conocido como prueba de rebote descrito en ASTM C805¹⁵ utilizando un esclerómetro. Se determinaron también parámetros físicos como absorción, densidad y porosidad de acuerdo a ASTM C672¹⁶. Posteriormente se trituró el CO mediante una trituradora de mandíbula y se obtuvo el AR. Se separó el AR en finos y gruesos por medio del tamiz #4, mayores a éste, se denominaron gruesos, y los retenidos entre éste y la malla #100 se denominaron finos. Enseguida, se caracterizaron los AN y los AR¹⁷⁻¹⁹ y se realizaron las diez mezclas con las características mostradas en la tabla 1. Previo a la realización de las mezclas, los AR fueron saturados por 10 minutos para controlar la relación a/c. Se fabricaron vigas rectangulares de 50 x 15 x 15 cm que sirvieron para los ensayos no destructivos de IR y FRI⁸ y cilindros de 10 x 20 cm para ensayos destructivos de resistencia a compresión y curva esfuerzo-desplazamiento a los 28 días de curado. El curado consistió en inmersión en agua a 25 C.

A las edades de 7, 28, y 90, se evaluó en las vigas el IR, y mediante FRI se determinó el módulo de elasticidad dinámico (Ed), el coeficiente de Poisson (μ) y el módulo de rigidez dinámico (Gd) siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C215⁸. A los 28 días de curado, la resistencia a compresión y la curva esfuerzo-deformación fueron determinados a partir del ensayo a compresión bajo el estándar ASTM C39²⁰.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las figuras 2 y 3, se pueden observar los resultados obtenidos respecto a ensayos no destructivos para mezclas con AGR y AFR, respectivamente. En todas ellas se observa que conforme aumenta el porcentaje de sustitución de AR, las propiedades elásticas disminuyen, lo cual es consistente con lo reportado en otras investigaciones^{3,21-30}. También se observa que el AR

no afecta el proceso de hidratación del CR, por la tendencia de las propiedades elásticas y del IR de aumentar conforme aumenta la edad de curado.

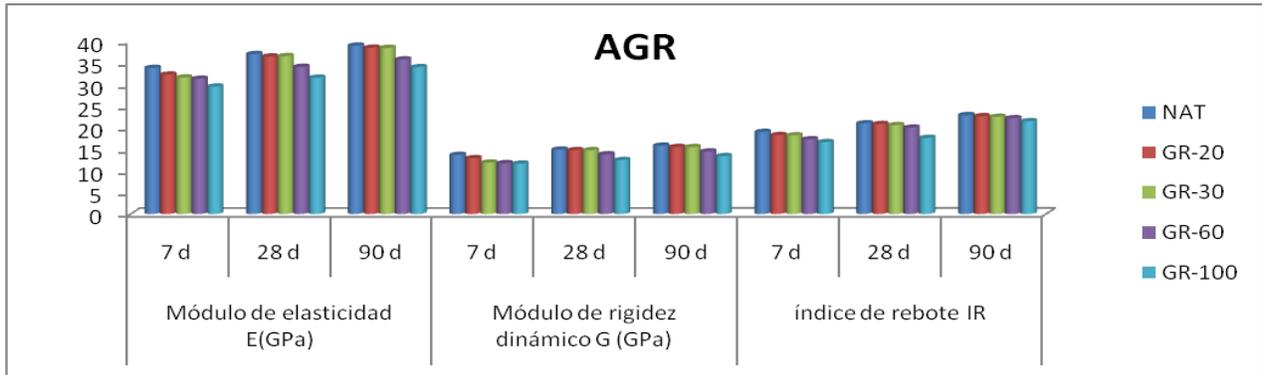


Figura 2. Resultados obtenidos de ensayos no destructivos para el CR con AGR

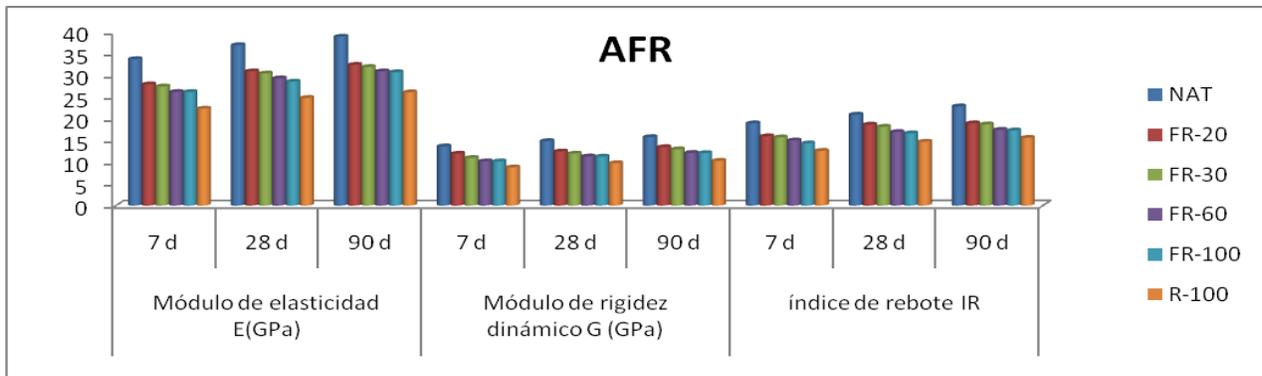


Figura 3. Resultados obtenidos de ensayos no destructivos para el CR con AFR

En mezclas con AGR (figura 2), se observa que hasta con un 30% de sustitución, las pérdidas en Ed, Gd e IR, no superan el 2%, lo que le confiere un comportamiento básicamente idéntico al concreto convencional^{4,24,28}, en el ámbito elástico. Incluso la GR-60 presenta un comportamiento muy similar, con pérdidas que no superan el 8%, mientras que para la GR-100, podemos observar que las pérdidas oscilan alrededor del 15%^{3,10,24}. Dichos resultados concuerdan con lo encontrado en las curvas esfuerzo-posición, las cuales presentan pendientes muy similares con respecto a la curva del concreto convencional.

En la figura 3, se muestran valores muy similares en las pérdidas del Ed, Gd e IR. Hasta con un 30% de AFR, las pérdidas oscila alrededor del 17%, mientras que para porcentajes superiores (FR-60 y FR-100), las pérdidas oscilan alrededor del 22%^{3,22,24}, lo que corrobora la cercanía entre las pendientes de las curvas esfuerzo-posición, donde se muestra que la FR-20 y la FR-30 tienen pendientes básicamente iguales, mientras que la FR-60 y FR-100, presentan menor pendiente, y mayores deformaciones. Para el caso de la R-100 se reportan pérdidas que superan el 30% y cercanos a éste, en Ed, Gd e IR.

En la figura 4, se observa que conforme aumenta el porcentaje de sustitución de AR, la resistencia a compresión disminuye, lo que concuerda a distintas investigaciones^{3,22,24-26,28-30}, esto puede deberse al enlace más débil entre los agregados reciclados y el mortero viejo que está unido a ellos, como lo proponen distintos autores^{2,26,27,31,32}. También se observa que para las

mezclas con AGR, hasta con 30% de sustitución las pérdidas no superan el 5%, mientras que para porcentajes mayores al 30%, como son la GR-60 y la GR-100, se reporta una disminución en la resistencia a la compresión del 10% y el 40%, respectivamente, lo que concuerda a lo reportado en bibliografía^{3,4,22,29}. Referente al AFR, se reportan pérdidas en la resistencia a la compresión que van del 25% (para FR-20) hasta superar el 50% (FR-100).

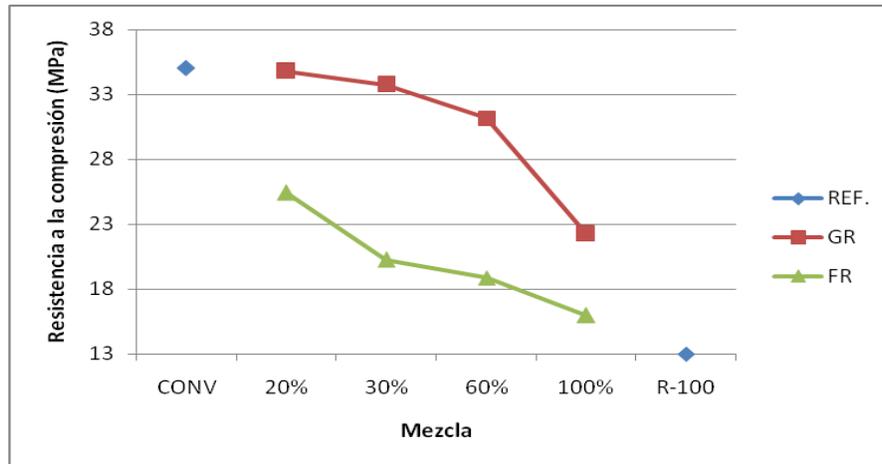


Figura 4. Resultados del ensayo destructivo de resistencia a compresión

Se corrobora que la curva esfuerzo-posición de concreto reciclado es muy similar a la del concreto convencional, como lo reportan distintos autores^{3,33,34}. En la figura 5, se puede destacar que todas las mezclas con AGR y grueso natural muestran deformaciones muy similares hasta una carga del 40% de la máxima aplicada, lo que corrobora los resultados obtenidos de Ed por FRI. La mezcla con 100% de AGR y AFR presenta grandes deformaciones y una carga máxima de 2 MPa, comportamiento muy inferior al concreto de referencia. En la figura 6, correspondiente a las mezclas con AFR, se pueden observar, para todas las mezclas deformaciones significativas con respecto a la mezcla de referencia; sin embargo el esfuerzo máximo que alcanzó la FR-20 y FR-30 es superior en un 30% a los valores del resto de las mezclas, lo que supone que el CR con AFR, se comporta de mejor manera con una sustitución de hasta un 30%.

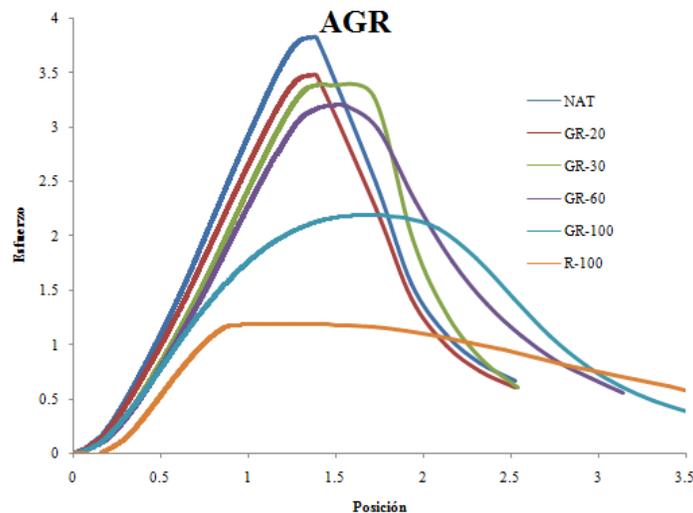


Figura 5. Curva esfuerzo-posición del CR con AGR.

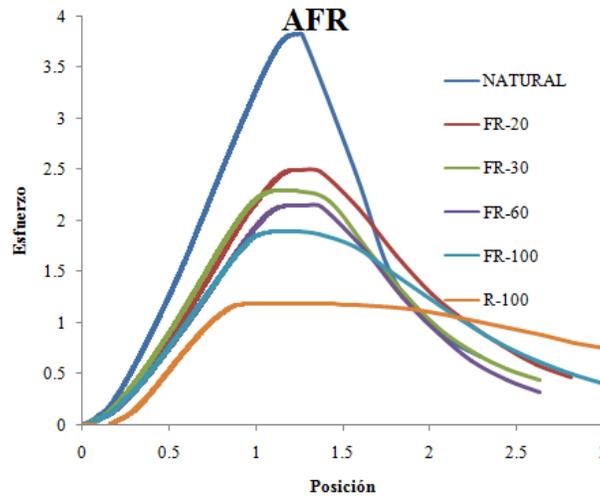


Figura 6. Curva esfuerzo-posición del CR con AFR.

CONCLUSIONES

Se corrobora que las propiedades elásticas y mecánicas del concreto disminuyen conforme aumenta el porcentaje de sustitución de AR, siendo más notorio para los AFR.

El CR con agregados procedentes de la demolición de pavimentos, tiene un comportamiento elástico satisfactorio, con pérdidas que van desde el 2%, hasta 22% para el caso más desfavorable, sin embargo las limitaciones de éste, se hallaron en la resistencia a compresión.

El concreto que contiene hasta 30% de sustitución de AGR, presenta un comportamiento mecánica y elástico prácticamente idéntico al del concreto convencional, presentando pérdidas inferiores al 5%, por lo que éste puede ser una excelente opción para ser utilizado de forma estructural, incluso se recomienda el uso de la mezcla GR-60, (con pérdidas inferiores al 10%), siempre y cuando se cumpla con un adecuado control de calidad, y además se recomienda evaluar propiedades de durabilidad.

El concreto que contiene hasta 30% de AFR presenta un comportamiento elástico con pérdidas del 17% al 22%, sin embargo la pérdida en la resistencia a la compresión es muy desfavorable bajo este método optado, no se recomienda su utilización como concreto estructural.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la FIM de la UAS, a la EPSEB de la UPC y a CONACYT

REFERENCIAS

- [1] J.M. Gómez-Soberón, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study", *Pergamon* 32 (2002): pp. 1301-1311
- [2] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, X. Huang, "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)", *Elsevier construction and building materials* 31 (2012): pp. 364-383.
- [3] B. González-Fontebao, F. Martínez-Abella, D. Carro-López, S. Seara-Paz, "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate", *Elsevier construction and building materials* 25 (2011): pp. 2335-2342
- [4] V. Corinaldesi, "Mechanical and elastic behaviour of concrete made of recycled-concrete coarse aggregates", *Elsevier construction and building materials* 24 (2010): pp. 1616-1620.
- [5] M. Tia, Y. Liu, D. Brown, "Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete", Final Report: U.F. Project No. 49104504973-12 (2005), Gainesville, FLORIDA.
- [6] A. Malaikah, K. Al-Saif, R. Al-Zaid, "Prediction of the dynamic modulus of elasticity of concrete under different loading conditions". International Conference On Concrete Engineering and Technology, (2004), Kuala Lumpur: MALAYSIA.
- [7] L.C. Cossolino, A.H. Pereira, "Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização" Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP, publicado online www.atcp.com.br, (2010).
- [8] ASTM C215 test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens.
- [9] J.R. Rosell, I.R. Cantalapiedra, "Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto, aplicado a morteros de cal y cemento", *Materiales de construcción* 61, 301 (2011): pp. 312-42.
- [10] D.K. Panesar, B. Shindman, "Elastic properties of self consolidating concrete", *Elsevier construction and building materials* 25 (2011): pp. 3334-3344.
- [11] Q. Liu, J. Xiao, Z. Sun, "Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete" *Elsevier construction and building materials* 41 (2011): pp. 1050-1057.
- [12] R. Corral-Higuera, "Sustentabilidad y reciclaje en la industria de la construcción", *Ecos del Desarrollo Urbano, Secretaría de Desarrollo Social* 130 (2011).
- [13] ASTM C31 Practice for making and curing concrete test specimens in the field.
- [14] ASTM C33 Specification for concretes aggregates
- [15] ASTM C805 test method for rebound number of hardened concrete.
- [16] ASTM C642 test method for density, absorption, and voids in hardened concrete.
- [17] ASTM C127 Test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.
- [18] ASTM C128 Test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate.
- [19] ASTM C136 test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates.
- [20] ASTM C39 Test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- [21] K.R. Wu, B. Chen, W. Yao, D. Zhang, "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete", *Pergamon* 31 (2001): pp. 1421-1425.
- [22] M. Casuccio, M. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, "Failure mechanism of recycled aggregate concrete", *Elsevier construction and building materials* 22 (2008): pp. 1500-1506.
- [23] A.E. Bezerra-Cabral, V. Schalch, D. Carpena, J.L. Duarte-Ribeiro, "Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete", *Elsevier construction and building materials* 24 (2010): pp. 421-430.
- [24] M. Chakradhara-Rao, S.K. Bhattacharyya, S.V. Barai, "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete", *Materials and Structures* 44 (2011): pp. 205-220.
- [25] H. Yıldırım, O. Sengul, "Modulus of elasticity of substandard and normal concretes". *Elsevier construction and building materials* 25 (2011): pp. 1645-1652.
- [26] Y. Sun, X. Xiao, "Experiment research on basic mechanic property of recycled concrete with different ratio of recycled aggregate" *Advanced materials research* 205-253(2011): pp. 994-1000.
- [27] Q. Liu, J. Xiao, "Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete", *Elsevier construction and building materials* 41 (2011): pp. 1050-1057.
- [28] B. González-Fontebao, F. Martínez-Abella, M.F. Herrador, S. Seara-Paz, "Structural recycled concrete: Behaviour under low loading rate" *Elsevier construction and building materials* 28 (2012): pp. 111-116.
- [29] J. A. Pérez-Benedicto, M. del-Río-Merino, J-L. Peralta-Canudo, M. delaRosa-LaMata, "Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricación", *Materiales de construcción* 62,305(2012): pp. 25-37.
- [30] S.C. Kou, C.S. Poon, "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate" *Elsevier Construction and building materials* 35 (2012): pp. 69-76.
- [31] Z. Hashin, P.J.M Monteiro, "An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste", *Pergamon, Cement and concrete research* 32 (2002): pp. 1291-1300.
- [32] J. XIAO, Q. Liu, Y.C. Wu, "Numerical and experimental studies on fracture process of recycled concrete", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* (2012): pp. 1460-1468.
- [33] T. Du, W. Wang, Z. Liu, H. Lin, T. Guo, "The Complete Stress-strain Curve of Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Compression Loading", *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition* 25 (2010): pp. 862-865.
- [34] M.F. Serrano-Guzmán, D.D. Pérez-Ruiz, "Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto". *Cemento y concreto* 2 (2010): pp. 17-30.