MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE AGREGADO Y AJUSTE NORMATIVO

M.N. PEREYRA, C. MONFORT, A. DELLEPIANE, P. VILA

Departamento de Construcción, Instituto de Estructuras y Transporte, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, web: <https://www.fing.edu.uy/iet>

RESUMEN

En Uruguay, la determinación experimental del módulo de elasticidad se realiza en casos excepcionales. Usualmente se estima vinculándolo a la resistencia a la compresión. Si bien la normativa internacional consultada considera en algunos casos un ajuste en función de las características del agregado no es así en la normativa nacional vigente UNIT 1050 ("Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón armado", 2005). El presente trabajo realiza una comparación entre valores experimentales del módulo de elasticidad para hormigones de fabricación local y los valores calculados a partir de diferentes normas internacionales de aplicación en nuestro medio. Se consideraron para el estudio hormigones elaborados para distintas obras ejecutadas por empresas privadas, de distintos niveles de resistencia con agregados gruesos principalmente de tres zonas del Uruguay (sur, centro y este). Los agregados considerados son granitos de distintas canteras, dolomía y gneis. A partir de los resultados obtenidos, es posible establecer una clara influencia del tipo de agregado en el módulo de elasticidad del hormigón. Se constatan diferencias entre los valores experimentales de módulo y los calculados a partir de las fórmulas teóricas, teniendo incluso en algunos casos valores sobreestimados del módulo de elasticidad. A partir de este estudio se buscará ajustar los valores de cálculo presentados por la normativa nacional, incluyendo en su determinación la influencia de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón.

Palabras clave: Módulo de elasticidad. Agregado. Ajuste normativo.

ABSTRACT

Experimental determination of the modulus of elasticity is not a common practice in Uruguay. Normally it is determined indirectly using equations given by different standards, based on the compressive strength of concrete - for example the current Uruguayan standard UNIT 1050 (2005). This research investigated the differences between experimental values of the modulus of elasticity and empirically based equations shown in the most commonly used standards in Uruguay. Concrete produced by private companies, using aggregates from quarries located in three zones in Uruguay, was evaluated. The coarse aggregates considered are granite from different origin, dolomite and gneiss. The results provide evidence that the type of coarse aggregate exerts an important influence on the deformation properties of concrete and therefore on the elastic modulus. From the experimental data obtained, it was found that there were differences between the physical and empirically based values, with overestimated values of elastic modulus in some cases. The goal of this research was to adjust the equations proposed in the national standard, in order to include the influence of the aggregates used.

Keywords: Modulus of elasticity, Aggregate, Adjustment of national standard.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción es una industria en constante búsqueda de nuevas metodologías de trabajo con el fin de simplificar los procedimientos constructivos para disminuir plazos y costos, generando mayor competitividad. Ejemplos de esto son la tipología constructiva de losas sin vigas, la proyección de elementos delgados y más esbeltos. Junto con esto surge la necesidad de modificar las dosificaciones de los hormigones utilizadas para lograr alcanzar las propiedades requeridas, fundamentalmente la resistencia mecánica y las deformaciones, siendo estas últimas en muchos casos el factor limitante de cálculo. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos no se realiza la determinación del módulo de deformación del hormigón, sino que se mantienen los controles por su resistencia a la compresión como es tradicional en nuestro medio. Esto se debe a que, más allá de que se trate de un ensayo más complejo y con una dispersión de resultados mayor al de compresión uniaxial, el valor de módulo de elasticidad puede estimarse según diferentes normativas a través de una correlación con la resistencia a la compresión del hormigón.

Cuando son solicitados valores elevados de módulo de elasticidad es una práctica habitual en nuestro medio, aumentar la resistencia a la compresión de los hormigones. Esto lleva en general a un aumento en el contenido de cemento y al uso de aditivos para lograr las propiedades deseadas con una buena colocación, lo que aumenta los costos de los hormigones además de generar los efectos negativos en el hormigón en estado fresco.

En Uruguay la normativa nacional vigente para el proyecto y ejecución de estructuras de hormigón es la norma UNIT 1050 (“Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón armado”, 2005). Diferentes calculistas en nuestro medio optan por utilizar otras normas internacionales, como lo son la norma americana ACI318 (2008), la española EHE08 (2008), o el Código Modelo (2010). Las distintas normas presentan fórmulas empíricas que vinculan el módulo de deformación del hormigón con su resistencia a la compresión (característica, requerida o media, dependiendo de la norma que se considere). Los resultados obtenidos difieren según la norma aplicada, teniendo en algunos casos una sobreestimación del valor de módulo. Por otro lado, no todas las normas consideran en el cálculo del módulo de elasticidad la composición del hormigón o el tipo de agregado que se está utilizando.

El objetivo del estudio es evaluar los resultados obtenidos de módulo de elasticidad para hormigones de distintos niveles de resistencia y elaborados con diferentes tipos de agregados. Esto permite ajustar la correlación que existe entre el valor de módulo de deformación y la resistencia a la compresión del hormigón según el agregado utilizado, verificando su influencia en los resultados obtenidos. De esta manera se busca encontrar alternativas al diseño de los hormigones para cumplir con las exigencias de proyecto tanto en estado fresco como en estado endurecido.

A partir de los resultados se podrá realizar un ajuste a las fórmulas empíricas de la normativa para su validación según los materiales locales.

2. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE DEFORMACIÓN Y FACTORES QUE LO AFECTAN

El módulo de deformación del hormigón E es la relación que existe entre la tensión y la deformación longitudinal unitaria en el rango elástico de la curva tensión-deformación. Se define en forma convencional como la pendiente de una cuerda que abarca un tramo inicial de la curva, zona en la que se considera que el hormigón tiene un comportamiento elástico.

Distintos factores afectan al módulo de deformación, entre ellos, la edad del hormigón al momento de aplicación de la carga, la condición de humedad de la probeta de control, la longitud de medida de las deformaciones, la velocidad de aplicación de la carga, la composición del hormigón y el tipo de agregados utilizados. En el caso de hormigones con dosificaciones especiales, como por ejemplo hormigones autocompactantes, donde se presenta un menor contenido agregados respecto a la pasta de

cemento, se han obtenido resultados diferenciados en cuanto al módulo de elasticidad, dependiendo del nivel de resistencia de la matriz (Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau. TUM, Querdehnung von Selbstverdichtendem Beton).

Para la determinación experimental del módulo E se utilizó el método de ensayo de la norma UNIT 1088 (2004). La norma establece la aplicación de 3 ciclos de carga previo a la toma de medidas de las deformaciones según se muestra en la gráfica de la Figura 2.1. La tensión máxima de cada ciclo de carga corresponde al 40% de la carga de rotura que es determinada en ejemplares de ensayo del mismo hormigón. El valor mínimo de tensión del ensayo es de 1MPa.

Figura 2.1. Desarrollo del ensayo para la determinación del módulo de deformación según la norma UNIT 1088

Las probetas son preparadas previo a su ensayo mediante el pulido de sus caras para obtener caras planas, paralelas entre sí y perpendiculares a su eje. No se utilizan neoprenos para el ensayo de módulo, como es la práctica habitual en nuestro medio para la determinación de la resistencia.

Las probetas son ensayadas en estado saturado a superficie seca a los 28 días de edad.

Para la determinación de las deformaciones se utilizan al menos dos compresímetros electrónicos independientes directamente conectados al sistema de adquisición de datos de la prensa de ensayo (ver Figura 2.2). Este sistema de medidas se adapta al tamaño de la probeta, por lo que puede ser utilizado tanto en probetas de 15cm de diámetro por 30cm de altura como a probetas de 10cm de diámetro y 20cm de altura. Las deformaciones se toman en el tercio central de las probetas en 2 o 3 generatrices, tomando el promedio de las deformaciones obtenidas, considerando una longitud de medida mayor a 3 veces el tamaño máximo del agregado utilizado. A modo de control de la correcta aplicación de la carga, se realiza un ciclo de carga inicial al 20% de la carga de rotura (ver Figura 2.2), lo que permite reacomodar los ejemplares de ensayo y los sistemas de medidas, hasta obtener una diferencia entre las lecturas de las deformaciones menor al 20% según indica la norma.

El módulo de deformación se calcula a partir de los resultados experimentales como:

$$E = \frac{\sigma_{40\%} - 1MPa}{\epsilon_{40\%} - \epsilon(1MPa)}$$

Figura 2.2 Sistema de medidas de deformaciones

3. FÓRMULAS EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD SEGÚN DIFERENTES NORMAS

Para la predicción del módulo E las normas adoptan la resistencia característica (f_{ck}) o media (f_{cm}), considerando en algunos casos la composición del hormigón como es el caso de la ACI que toma en cuenta la densidad del material o el origen del agregado como la norma EHE o el Código Modelo. A continuación, se presentan las fórmulas empíricas para las normas de uso más habitual en nuestro medio.

UNIT 1050:2005

$$E = 19000 * \sqrt{f_{ck}} \text{ (en daN/cm}^2\text{)} \quad (1)$$

f_{ck} : Resistencia característica a la compresión, expresada en daN/cm².

f_{cm} : Resistencia media a la compresión, expresada en daN/cm².

En la norma se encuentran relaciones aproximadas entre f_{ck} y f_{cm} dependiendo de las condiciones previstas para la ejecución de la obra. Se tienen los siguientes casos presentados en las ecuaciones (2) a (4):

Condiciones medias (cemento sin conservación adecuada):

$$f_{cm} = 1,50 f_{ck} + 20 \quad (2)$$

Condiciones buenas (agregados medidos en volumen y su humedad es medida periódicamente, instrumental mínimo en obra para comprobaciones oportunas):

$$f_{cm} = 1,35 f_{ck} + 15 \quad (3)$$

Condiciones muy buenas (agregados medidos en peso, laboratorio con personal e instalaciones necesarias):

$$f_{cm} = 1,20 f_{ck} + 10 \quad (4)$$

ACI 318-11

Para hormigones de densidad comprendida entre 1440 y 2550 kg/m³

$$E = w_c^{1,5} * 0,043 * \sqrt{f_{cm}} \text{ (en MPa)} \quad (5)$$

w_c = Densidad el hormigón (en kg/m³)

La norma presenta relaciones aproximadas entre f_{ck} y f_{cm} dependiendo de la resistencia del hormigón en consideración según se indica en las ecuaciones (6) a (8).

$$\text{Si } f_{ck} < 21 \text{ MPa: } f_{cm} = f_{ck} + 7 \quad (6)$$

$$\text{Si } 21 \text{ MPa} < f_{ck} < 35 \text{ MPa: } f_{cm} = f_{ck} + 8,3 \quad (7)$$

$$\text{Si } f_{ck} > 35 \text{ MPa: } f_{cm} = 1,10 f_{ck} + 5 \quad (8)$$

Distintos trabajos proponen factores de corrección en función del origen del agregado considerado (Tibbetts et. al; Noguchi et. al, entre otros).

EHE-08

$$E = 8500 * \sqrt[3]{f_{cm}} \text{ (en MPa)} \quad (9)$$

f_{cm} resistencia media (en MPa). Si no se conoce y las condiciones de fabricación son buenas se puede estimar como se indica en la ecuación (10).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2 \quad (10)$$

Se introduce un coeficiente (α) corrector del módulo en función de la naturaleza del agregado grueso utilizado en la fabricación del hormigón, según Tabla 3.1.

Código Modelo 2010

$$E = 21500 * \alpha_E \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \text{ (en MPa)} \quad (11)$$

f_{cm} resistencia media (en MPa). Si no se conoce se puede estimar como:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2 \quad (12)$$

El coeficiente (α_E), indicado en la Tabla 3.1, es un factor corrector del módulo en función de la naturaleza del agregado grueso utilizado.

Tabla 3.1. Factor de corrección del módulo de deformación (α) según el tipo de agregado.

Tipo Árido		Valor de α , según la norma EHE	Valor de α_E , según el Código Modelo
Cuarcita		1,0	1,0
Arenisca		0,7	0,7
Caliza	Normal	0,9	0,9
	Densa	1,2	1,2
Ofita, basalto y otras rocas volcánicas	Poroso	0,9	-
	Normal	1,2	1,2
Granito y otras rocas plutónicas		1,1	-
Diabasas		1,3	-

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO.

Se consideraron para el análisis hormigones de varios niveles de resistencia elaborados en obra, con distintos tipos de agregados, dos de la zona sur del Uruguay (cercanías de Montevideo, canteras A y C), dos de la zona este del país (Maldonado, canteras B y D) y una del centro del país (cantera D), según se indica en Tabla 4.1. No se dispone de las dosificaciones de los hormigones, ya que se trata de fórmulas utilizadas por distintas empresas hormigoneras del medio, las cuales se reservan esta información (salvo un tipo de hormigón que fue elaborado en laboratorio). Sí se solicitó información sobre el tipo y origen de los agregados utilizados, el que se constató en la matriz de los hormigones luego de los ensayos de compresión. A partir de esta información se visitó las canteras de extracción de los agregados para la toma de muestras del macizo rocoso para determinar el tipo de roca a partir del análisis mineralógico con lupa y su módulo de elasticidad, a excepción del agregado de la cantera identificada como B por no contar con material de tamaño suficiente para la preparación de muestras para su ensayo y del agregado E, por no disponer de información precisa de su ubicación. Para la determinación del módulo de los testigos de roca, se siguió la norma IRAM 10607 (2008). En estos casos se utilizó galgas extensiométricas para la medida de las deformaciones.

Al no contar con información de las dosificaciones, no se consideran para el análisis las proporciones relativas de los componentes. Se trata en todos los casos de hormigones vibrados tradicionales, con resistencias mayoritariamente entre 30 y 60MPa.

A continuación, en la Tabla 4.1 se presenta un resumen de los hormigones considerados para el trabajo, identificando 5 grupos según el origen y tipo de agregado. Se presenta también el valor de módulo de los agregados en aquellos casos que fue determinado en el laboratorio.

Tabla 4.1. Hormigones según el origen de los agregados.

Cantera	Ubicación cantera	Tipo de agregado	Módulo de elasticidad (GPa)	Observación
A	Montevideo (sur del país)	Granodiorita Cañada de las canteras	76,0	Hormigones de distintas obras dentro de la ciudad de Montevideo, hormigón premezclado.
B	Maldonado (sur este del país)	Granito Aiguá	(2)	Muestras pertenecientes a una obra en la ciudad de Punta del Este, hormigón premezclado.
C	Canelones (sur del país)	Granito La Paz	63,0	Hormigón elaborado en laboratorio del Departamento de Construcción
D	Maldonado (sur este del país)	Dolomía	92,4	Muestras pertenecientes a una obra en la ciudad de Punta del Este, hormigón premezclado.
E	Desconocida ⁽¹⁾	Gneis (faja granito gnéisica)	(2)	Muestras pertenecientes a una obra en la zona de Peralta, hormigón elaborado en planta en la obra.

- (1) Se presume del centro del país por la ubicación de la obra y por el análisis mineralógico a lupa del agregado en la masa de los ejemplares de ensayo.
- (2) No se dispone de muestras para su ensayo.

Los hormigones controlados corresponden a hormigones colocados en estructuras, siendo las probetas de control elaboradas en obra y suministradas a nuestro laboratorio para su ensayo. En algunos casos se fabricaron probetas de 15cm x 30cm y en otros de 10cm x 20cm por el mayor nivel de resistencia. Se realizó una corrección del valor de la resistencia por un factor de 0,97 para las probetas de 10cm x 20cm tomando como tamaño de referencia la probeta de 15cm x 30cm, según indica el manual “Hormigón” de Fernández Cánovas (2007). Se consideró que no hay diferencia en los resultados para los ejemplares de distintas dimensiones considerando tensiones de rotura entre 30 y 60 MPa.

Para cada muestra de hormigón ensayada se tomó al menos dos ejemplares de ensayo, uno de ellos para determinar la resistencia a la compresión y uno o dos ejemplares para la determinación del módulo E de la muestra. Una vez determinada la resistencia del hormigón en una de las probetas, se establece el valor máximo de tensión para los ciclos de carga del ensayo (40% de la carga de rotura). Realizados los ciclos de carga para la determinación de los valores de deformación, se interrumpe el ensayo y se retiran los compresímetros para luego continuar el ensayo hasta la rotura de la probeta. Se comprueba que el valor de rotura de la probeta no difiera en más de un 20% del valor de rotura determinada en la probeta de la misma muestra de hormigón.

Para el análisis se consideraron agregados de 5 canteras, indicados en la Tabla 4.1. Al tratarse de ensayos sobre probetas de obra, la cantidad de ejemplares para cada tipo de agregado varía en función de las necesidades o capacidades de control de cada obra. En la tabla 4.2 se indican para cada caso la cantidad de muestras ensayadas.

Tabla 4.2. Cantidad de muestras ensayadas

Cantera	Tipo de agregado	Cantidad de muestras de hormigón
A	Granodiorita	72
B	Granito Aiguá	39
C	Granito La Paz	7
D	Dolomía	67
E	Gneis	16

5. RESULTADOS

En la Figura 5.1 se muestra el resultado de módulo E en función de la resistencia media a la compresión para los distintos tipos de agregados analizados.

En la gráfica se pueden identificar diferencias en los valores de módulo para una misma resistencia en función del tipo de agregado utilizado, pudiéndose definir 3 franjas de comportamiento diferenciado:

- Una zona de módulos claramente superior para la dolomía de la cantera D, donde es posible obtener módulos de más de 40GPa para resistencias del entorno de los 50MPa.
- Una franja inferior donde no se alcanzan valores de módulos mayores a 30GPa con resistencias de 50MPa, debiendo aumentar las resistencias a más de 60MPa para obtener valores de módulo que superen apenas los 30GPa.
- La zona central donde se ubican los agregados de la Cantera A (granodiorita) y de la Cantera C (granito La Paz) principalmente.

Puede observarse que para el caso de las canteras A y C, los módulos de elasticidad determinados en las rocas tienen valores de 73 y 63GPa respectivamente, según se indicó en la Tabla 4.1, mientras que para el caso de la cantera D, el valor de módulo de la roca se encuentra sobre los 90GPa, lo que puede explicar el comportamiento diferente del módulo de elasticidad de los hormigones elaborados con estos agregados.

Figura 5.1 Grafico del módulo de deformación E en función de la resistencia a la compresión media, según el tipo de agregado.

Las gráficas de las Figuras 5.2 a 5.5 muestran los valores de Módulo E calculados a partir de la resistencia media y las predicciones de E a partir de las fórmulas, para cada una de las normas indicadas en el punto 3.

Figura 5.2 E vs. fcm y predicción UNIT

Figura 5.3 E vs fcm y predicción ACI

Figura 5.4 E vs. fcm y predicción EHE

Figura 5.5 E vs fcm y predicción Cód. Modelo

La normativa nacional vigente (UNIT 1050:2005) no tiene en cuenta en la predicción del módulo de deformación el tipo de agregado utilizado. Considerando la situación de condiciones buenas de control de obra, la gráfica de la Figura 5.2 muestra que la predicción del módulo se ajusta razonablemente bien a los valores experimentales obtenidos para los hormigones con el uso de los agregados de las canteras A y C, ubicadas en la zona sur del país (cercasas a la ciudad de Montevideo), aunque sobreestimando los valores para los hormigones de mayor resistencia y subestimándolo para los hormigones de menor resistencia. Esta predicción no se ajusta a los otros tipos de agregados de las demás canteras en estudio. La predicción de la norma ACI318 (Figura 5.3) presenta un comportamiento similar al de la norma UNIT 1050, ajustándose mejor en los rangos de mayor resistencia y subestimando el valor del módulo para resistencias menores a 40MPa.

La instrucción española EHE-08 presenta las curvas de predicción que mejor se ajustan a los valores de módulo medidos, según puede observarse en la Figura 5.4. Considerando la fórmula de predicción con corrección para granito como tipo de agregado, se tiene que la misma se ajusta a los valores obtenidos para la cantera A (granodiorita) y C (granito La Paz). Esta norma presenta correcciones de las fórmulas de predicción según el tipo de agregado. A pesar de no coincidir el origen de los agregados en estudio con los indicados por la norma, se identifica que es posible considerar coeficientes de ajustes específicos para cada tipo de agregado. Cabe resaltar que para este análisis se realizó un estudio mineralógico primario con lupa, no se dispone de un ensayo petrográfico para una descripción detallada del agregado. El caso del Código Modelo (2010), presentado en la Figura 5.5, es similar al de la norma EHE con una pendiente algo mayor en la curva de ajuste que lleva a un mejor ajuste en la curva para valores altos de resistencia y valores de módulo subestimados para los valores más bajos de resistencia, como se presenta también en las curvas de predicción del ACI 318.

6. CONCLUSIONES

El trabajo experimental realizado, considerando los hormigones elaborados con agregados de diferentes canteras de nuestro país, demuestra la necesidad de modificar las fórmulas de predicción del módulo E en la normativa nacional UNIT 1050, así como la pertinencia de la incorporación de factores de corrección según el origen de los agregados. A partir del trabajo se identifica un comportamiento diferenciado para los agregados de las canteras A y C (granodiorita y granito La Paz), respecto a los agregados de la cantera D (dolomía) y de las canteras B (granito Aiguá) y E (gneis).

Como se mencionó anteriormente no se cuenta con información acerca de las dosificaciones utilizadas, por lo que se desconoce las proporciones de pasta y agregados de los hormigones analizados. Para poder proponer las fórmulas de predicción con los ajustes mencionados se deberá realizar una campaña de ensayo en laboratorio, la cual se encuentra actualmente en desarrollo en el marco de un proyecto de investigación en la temática. Esta campaña experimental de ensayos tiene en cuenta además del tipo de agregado, la composición de los hormigones para verificar su influencia en los resultados obtenidos.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al laboratorio del Dpto. de Construcción (IET, Facultad de Ingeniería) por la realización de los ensayos, a la Comisión Sectorial de Investigación Científica y a la empresa Stiler S.A. por el financiamiento del proyecto en curso. Se agradece también a las empresas del medio por la información brindada sobre los hormigones ensayados y utilizados para este estudio.

8. REFERENCIAS

- American Concrete Institute (2008). *ACI318-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*.
- ACI Structural Journal (2018). *Aggregate Correction Factors for Concrete Elastic Modulus Predictions*. Caitlin M. Tibbetts, Michael C. Perry, Christopher C. Ferraro, and H.R. (Trey) Hamilton. Technical Paper N°115-S71
- Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau (2007). *Quedechnung von selbstverdichtendem Beton*. Technische Universität München. María Noel Pereyra.
- Manuel Fernández Cánovas (2007). *Hormigón*. Colegio de Ingenieros de Caminos, canales y puertos.
- Federation International du Beton FIB. *fib Bulletin 55: Model Code 2010, First complete draft*.
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación. IRAM 10607 (2008): *Geotécnica. Método de determinación de la resistencia a la compresión uniaxial, del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson en probetas de roca*.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. UNIT 1050:2005: *Proyecto y Ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado*.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. UNIT 1088:2004: *Hormigón. Determinación del módulo estático de elasticidad y de deformación y de la curva tensión - Deformación*.
- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. <https://www.fomento.gob.es/organos-colegiados/mas-organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/instrucciones/ehe-08-version-en-castellano>