INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA NO MÓDULO DE YOUNG DE ARGAMASSAS PRODUZIDAS COM CIMENTO PORTLAND

G. C. R, Garcia, E. M. B, Santos, S. Ribeiro, Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de Lorena (EEL) Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) Estrada Santa Lucrecia s/n, Bairro Mondezir, CEP 12600-970, CP 116, Lorena SP giselicrg@ppgem.eel.usp.br

RESUMO

O concreto de cimento Portland é um dos materiais mais usados no mundo inteiro, entretanto sua estrutura é muito complexa. O concreto é formado por uma pasta ou argamassa de cimento, areia e água, com adição de agregados graúdos. As propriedades do concreto estão basicamente suportadas nessa pasta de constituição. Dessa forma, torna-se imprescindível estudar suas propriedades com bastante profundidade. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento do módulo elástico com o tempo de cura de duas argamassas com composições 1:2 e 1:3, curadas a 25°C em atmosfera saturada de água. Os resultados mostraram que essa propriedade cresce até atingir o valor máximo no oitavo dia, sendo que nos três primeiros dias esse crescimento é mais acentuado. A análise dos resultados indica que grande parte do processo de hidratação do cimento, com formação das ligações químicas responsáveis pelo enrijecimento da argamassa, acontece nos primeiros dias de cura.

Palavras-chave: Cimento Portland, argamassa, concreto, cura, módulo de Young.

INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais usados no mundo todo e pode ser definido como um material macroscopicamente heterogêneo que apresenta propriedades dependentes de suas fases, da relação entre as mesmas, bem como de seus constituintes⁽¹⁻⁴⁾. Durante muito tempo afirmou-se que o concreto apresentava duas fases distintas: a matriz, uma pasta formada por água e cimento, e os agregados, mas no início da década de 90 pesquisadores classificaram a zona de transição entre agregado e pasta de cimento como uma terceira fase, tendo esta grande influência nas propriedades elásticas das argamassas e concretos⁽⁵⁻⁸⁾.

A argamassa é constituída de cimento, areia e água, sendo que a areia é considerada um agregado miúdo, logo, o concreto é uma argamassa acrescida de agregados graúdos⁽¹⁻⁶⁾. O tipo de agregado também oferece influência significativa nas propriedades mecânicas do concreto, uma vez que tanto a geometria como a superfície do agregado devem ser considerados^(2,9,10).

A razão água/cimento talvez seja um dos parâmetros mais relevantes no preparo de argamassas, pois a relação das reações de hidratação com o tempo estão intimamente ligadas a essa razão^(10,11). O cimento tipo Portland é o aglomerante mais utilizado na produção de concreto. Seus principais constituintes são os silicatos de cálcio: C₃S (silicato tricálcico-3CaO.SiO₂) e C₂S (silicato dicálcico-2CaO.SiO₂); os aluminatos de cálcio: C₃A (aluminato tricálcico-3CaO.Al₂O₃) e o C₄AF (ferroaluminato de cálcio-4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃), além da gipsita (CaSO₄.2H₂O) que é adicionada para inibir a tendência à pega instantânea do clínquer devido a reatividade do C₃A, bem como formar a etringita^(12,13).

A hidratação dos aluminatos confere o enrijecimento da argamassa, enquanto a dos silicatos, principalmente do tricálcico, confere o endurecimento, ou, aumento da resistência, principalmente nos estágios iniciais de hidratação ^(12,14,16,17). Os silicatos de cálcio hidratados são representados genericamente por C-S-H, eles, juntamente com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, preenchem o espaço ocupado pela água e pelas partículas de cimento em dissolução⁽¹⁵⁻¹⁷⁾.

O conhecimento das propriedades elásticas de argamassas e concretos, bem como as principais propriedades que caracterizam a rigidez elástica dos materiais, como módulo de Young, E, módulo de cisalhamento, G, e razão de Poisson, µ, são

indispensáveis na determinação de várias outras propriedades mecânicas dos materiais^(18,19).

O módulo de elasticidade é uma medida de rigidez que avalia a resistência do material à deformação elástica. Os materiais que deformam muito elasticamente quando sujeitos a solicitações mecânicas possuem baixo módulo, são indicados quando a deformação é apenas transitória. No entanto, na maioria das aplicações não se deseja a ocorrência de deflexões, ou seja, os materiais devem apresentar alto módulo de elasticidade⁽²⁰⁾.

O módulo de elasticidade ou módulo de Young, representado por E, é definido pela Lei de Hooke, equação seguinte, que descreve matematicamente o comportamento experimental de determinados materiais, nos quais a deformação (ϵ) é praticamente proporcional à tensão(σ) quando as deformações são pequenas⁽²¹⁾:

$$\sigma = E\epsilon$$
 (A)

Geralmente os métodos utilizados para tal medida podem ser divididos em duas classes: métodos estáticos e métodos dinâmicos.

Os métodos estáticos consistem em solicitar mecanicamente um corpo por meio de aplicação de tensão, podendo ser de tração, compressão, flexão ou torção, com baixas velocidades de aplicação de carga^(18,19).

Os métodos dinâmicos consistem basicamente na determinação da freqüência natural de um corpo de prova pelo emprego da energia das ondas elásticas e na medição da velocidade de propagação de onda através de um corpo. As tensões aplicadas nesse método são muito menores que a no primeiro, garantindo que o material está no regime elástico⁽¹⁹⁾. Dentre os métodos dinâmicos, destaca-se a técnica de ressonância mecânica de barras⁽²²⁻²⁵⁾.

O princípio do método da ressonância mecânica de barras consiste no estímulo de um corpo de prova com freqüência variável, na busca das freqüências de ressonância de vibração desse corpo e por meio de relações matemáticas determinam-se os módulos elásticos. Essas relações são específicas para cada geometria de corpo de prova^(24,25). Ida e Foster são referenciados como proponentes da metodologia referida⁽²²⁾.

Experimentalmente, um equipamento automático, baseado no método da ressonância de barras, foi desenvolvido para medir as propriedades elásticas do material (E, G, µ). Este equipamento consiste na passagem de uma vibração

mecânica pela amostra através de um transdutor piezelétrico. A vibração é sentida no outro transdutor e transformada em sinal elétrico, transmitida para o programa computacional que registra os picos de ressonância, e de modo interativo calcula o módulo elástico e de cisalhamento, assim como a razão de Poisson⁽²⁴⁻²⁶⁾. O sistema utilizado é da ATCP/ME-C1198-91 obedecendo a norma ASTM C1198-91.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o comportamento do módulo elástico com o tempo de cura das argamassas de duas composições em termos de cimento:areia de 1:2 e 1:3, com razões água:cimento de 0,46 e 0,56, respectivamente, com a finalidade de mostrar que as propriedades elásticas das argamassas se estabilizam antes dos 28 dias como previstos na literatura⁽²⁷⁻²⁸⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para obtenção das amostras foram utilizados: areia média lavada; cimento Portland CPII-E-32 da Companhia de Cimento Montes Claros; e água potável.

Foram preparadas duas composições mássicas em termos de cimento, uma 1:2 e outra 1:3. A quantidade de água foi baseada na razão água:cimento de 0,46 para 1:2, e 0,56 para 1:3.

A areia e o cimento foram pesados previamente e colocados em uma argamassadeira planetária de laboratório com capacidade nominal de 5 litros, onde foram misturados por três minutos a 60 rpm. Em seguida a água foi adicionada lentamente, com a argamassadeira trabalhando, ficando mais um minuto na mesma rotação, e depois um minuto na velocidade a 120 rpm. Enquanto a mistura é vertida em um molde de aço inoxidável, Figura1, este é vibrado em uma mesa vibratória. Em cada moldagem obtêm-se 5 barras prismáticas com dimensões de 25x25x150 mm³.



Figura 1: Fotografia do molde utilizado na confecção das barras prismáticas para as medidas de módulo elástico obtidas com uma câmera digital.

Com a mistura vertida e vibrada, o molde é levado à cura em atmosfera saturada de água a 25°C por 24 horas, quando então as amostras são desmoldadas e pesadas para a realização da primeira medida de módulo elástico. A faixa de freqüência adotada na varredura das medidas foi de 1 a 3 kHz. Após realização das medidas as amostras voltam para cura, sendo esse procedimento repetido até completos 28 dias de cura.

Durante a moldagem foi tomado o cuidado para que as amostras tivessem superfície o mais uniforme possível, a fim de não fosse necessário retificar a superfície superior da amostra. Para realização das medidas foi adotado que esta face ficaria sempre voltada para trás.

Para análise das fases presentes nas amostras, foi utilizado um difratometro de raios X Siemens, de radiação Cu-Kα, com intervalo angular de 5 a 75° e passo de 0,05°/min. As fotografias foram obtidas com câmera digital da Sony - 7.2 MegaPixel. Para análise de microestrutura, as amostras foram recobertas com um filme fino de carbono e observadas em microscópio eletrônico de varredura, MEV, da LEO, modelo 1450 VP, no modo elétrons secundários.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados de Módulo de Young nos dias em que as medidas apresentaram resultados mais significativos. Para cada composição foram moldadas cinco amostras, sendo assim os resultados apresentados são médias com seus respectivos desvios.

Composição	Módulo Elástico, E, (GPa) em					
da	função do tempo de cura (dias)					
argamassa	1	2	3	7	8	28
1:2	17, 38 ±	23, 82 ±	25, 05 ±	27, 17 ±	27, 51 ±	28, 26 ±
	0,28	0,45	0,15	0,32	0,30	0,38
1:3	10, 48 ±	17, 54 ±	18, 39 ±	20, 41 ±	20, 61 ±	21, 16 ±
	0,52	0,70	0,89	1,01	1,17	1,24

Tabela 1: Medidas do módulo de Young das argamassas 1:2 e 1:3.

Os resultados das medidas diárias dos módulos de Young para as argamassas 1:2 e 1:3 estão indicados nas curvas da Figura 2.



Figura 2: Variação do Módulo de Young em função do tempo de cura, em dias, das argamassas 1:2 e 1:3.

Na composição 1:3 o aumento do módulo de Young do primeiro para o segundo dia foi mais acentuado que na composição 1:2. Essa diferença pode ser explicada pela maior quantidade de água adicionada à composição 1:3, pois a relação cimento/água é 10% maior nesta composição, o que possibilita a hidratação dos silicatos e aluminatos presentes logo após a adição de água. Do segundo ao oitavo dia o crescimento é gradativo e lento, sendo que após oito dias de cura é estabilizado. Também é notável a diferença dos desvios da 1:2 para 1:3, levando-nos a crer que a argamassa 1:2 oferece uma estrutura mais definida que a 1:3.

A Figura 3 mostra os difratogramas das argamassas 1:2, (a), e 1:3, (b), obtidos a partir do pó das amostras após 28 dias completos de cura para análise de fases. Observa-se um difratograma com as mesmas fases que diferem apenas nas intensidades dos picos devido as diferentes proporções de matérias-primas. A etringita aparece nos dois difratogramas em pequena proporção, sendo que na 1:3 seus picos são um pouco mais intensos que na 1:2.



Figura 3 - Difratogramas das argamassas 1:2, (a), e 1:3, (b), com 28 dias de cura.

A Figura 4 mostra as fotomicrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura no modo elétrons espalhados das argamassas nas composições 1:2, (a),e 1:3, (b), da superfície de fratura com tempo de cura superior a 28 dias. Em (a) e (b) observa-se a matriz formada pelos silicatos hidratados, sendo que a etringita, que exibe microestrutura na forma de agulhas⁽²⁹⁻³²⁾, está mais presente em 1:3 que 1:2, pois com uma mesma ampliação, 5000 vezes, consegue-se observar várias agulhas de etringita, enquanto que na 1:2, só com uma ampliação de 10000 vezes, (c), é possível identificá-la.



Figura 4: Fotomicrografias, obtidas por microscopia eletrônica de varredura no modo elétrons espalhados, das argamassas nas composições 1:2, (a) e (c), e 1:3, (b).

Fazendo uma análise comparativa das fotomicrografias com os difratogramas, observa-se que as agulhas de etringita são mais nítidas na argamassa 1:3 que 1:2. Acredita-se que por haver uma maior proporção de água na 1:3, a taxa de hidratação num primeiro momento seja maior, havendo maior formação da fase etringita, e que ela não se decompôs totalmente. Sabe-se que o que confere resistência mecânica nas argamassas é a hidratação dos silicatos⁽¹²⁻¹³⁾, como na 1:2 a proporção desses silicatos deve ser maior, sua resistência também é maior, logo seu módulo de Young também.

CONCLUSÕES

A quantidade relativa de areia, bem como a água interferem diretamente no módulo de Young das argamassas.

A argamassa de composição 1:2 apresenta módulo de Young em torno de 30% superior à 1:3, evidenciado que a mesma é mais resistente à deformação elástica, além de seus resultados serem mais confiáveis com relação aos desvios obtidos.

Os resultados encontrados apontam que no oitavo dia as amostras já atingiram seu estado de máxima resistência a deformação elástica.

Análises mais específicas devem ser realizadas em trabalhos futuros, a fim de que se possa comprovar, como análise por EDS, e não somente comparar com a literatura.

A técnica da ressonância mecânica de barras utilizada para medidas de módulo de Young é bastante confiável quanto à reprodutibilidade e precisão dos valores medidos.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, processo 07/55964-3, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPQ, pela bolsa de Mestrado, processo 135921/2008-2, pela bolsa de Doutorado, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa, processo 302387/2007-2. Ao Centro Técnico Aeroespacial, CTA, pelas análises de microscopia eletrônica de varredura, MEV.

REFERÊNCIAS

1. STROEVEN, P., A stereological approach to roughness of fracture surfaces and tortuosity of transport paths in concrete. *Cement & Concrete Composites*, v.22, p.331-341, 2000.

2. SADOWSKI, T.; GOLEWSKI, G., Effect of aggregate kind and graining on modelling of plain concrete under compression. *Computacional Materials Science*, v.43, p.119-126, 2008.

3. AKÇAOGLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELIK, T., Assessing the ITZ microcracking via scanning electron microscope and its effect on the failure behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, v.35, p.358-363, 2005.

4. RIBEIRO, S.; RODRIGUES, J.A., Determinação da influência da composição no comportamento de fratura de argamassas utilizando o método da cunha. In: 52° Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, SC, 2008.

5. SUN, Z.; GARBOCZI, E.J.; SHAH, S.P., Modeling the elastic properties of concrete composites: Experiment, differential effective medium theory, and numerical simulation. *Cement & Concrete Composites*, v.29, p.22-38, 2007.

 BENTZ, D. P.; STUTZMAN, P.A.; GARBOCZI, E.J., Experimental and simulation studies of the interfacial zone in concrete. *Cement and Concrete Research*, v.22(5), p. 891-902, 1992.

7. PROKOPSKI, G.; HALBINIAK, J., Interfacial transition zone in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v.30, p. 579-583, 2000.

8. NADEAU, J.C., Water-cement ratio gradients in mortars and corresponding effective elastic properties. *Cement and Concrete Research*, v.32, p. 481-490, 2002.

9. MOHAMED, A.R.; HANSEN, W., Micromechanical modeling of crack-aggregate interaction in concrete materials. *Cement & Concrete Composites*, v.21, p.349-359, 1999.

10. ERDOGDU, S.; KURBETCI, S., Influence of cement composition on the early age flexural strength of heat-treated mortar prisms. *Cement & Concrete Composites*, v.27, p.818-822, 2005.

11. BOUMIZ, A.; VERNET, C.; TENOUDJI, F.C., Mechanical properties of cement pastes and mortars. *Advn. Cem. Bas. Mat.*, v.3, p.94-106, 1996.

12. MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: PINI, 1994, 573p.

13. MONTEIRO, P.J.M., *Microstructure of concrete and its influence on the mechanical properties*. 1985, 153p. Tese (Doutorado) – University of California, Berkeley, California.

14. FREITAS, F.A.E., *Microfissuração e evolução da hidratação de concreto do cimento Portland, com e sem adição de escória, por meio de análise de imagens*. 2001, 185p. Dissertação (Mestrado em Eng. Civil) – Universidade de Campinas, UNICAMP, Campinas, São Paulo.

15. FAMY, C.; BROUGH, A.R.; TAYLOR, H.F.W., The C-S-H gel of Portland cement mortars: Part I. The interpretation of energy-dispersive X-ray microanalyses from scanning electron microscopy, with some observations on C-S-H, AFm and Aft phase compositions. *Cement and Concrete Research*, v.33, p. 1389-1398, 2003.

16. BERNARD, O.; ULM, F.J.; LEMARCHAND, E., A multiscale micromechanicshydration model for the early-age elastic properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, v.32, p. 1293-1309, 2003.

17. BENTZ, D.P., A review of early-age properties of cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, v.38, p. 196-204, 2008.

18. HAYDEN, W., MOFFATT, W. G., WULFF, J., *Mechanical Behavior*, New York, EUA: John Wiley & Sons, 1965.

19. ZANOTTO, E. D., MIGLIORY Jr. A. R., Propriedades Mecânicas de Materiais Cerâmicos: Uma Introdução. *Cerâmica*, 37 (247), p.7-16, 1991.

20. AGUILAR, M.T.P., SILVA, A.P., CORRÊA, E.C.S., CETLIN, P.R., Análise da Capacidade de deformação do concreto: módulo de Young X módulo de deformação. In: 17° CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 2006.

21. VOGT, J.C., *Estudo da influência de adições do módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais*. 2006, 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG/Belo Horizonte, MG.

22. SCHREIBER, E., ORSON, A. L., SOGA, N., Dynamic Ressonance Method for measuring the elastic moduli of solids. *Elastic Constants and their measurement*, McGraw-Hill, p. 82-125, 1973.

23.BOCCACCINI, D. N., ROMAGNOLI, M., KAMSEU, E., VERONESI, P., LEONELLI, C., PELLACANI, G. C., Determination of Termal Shock Resistance in Refractory Materials by Ultrasonic Pulse Velocity Measurement. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27 (2007) 1859.

24. *ASTM: E 1875 – 00*, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Ressonance, 2002.

25. *ASTM: C 1198 – 91*, Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for advanced ceramics by Sonic Ressonance, 2002.

26. PAIVA, A. E. M., RODRIGUES, J. A., Projeto e Construção de um Equipamento Para a Determinação do Módulo Elástico pelo Método de Ressonância de Barras. In: 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis-SC, 2001. *Anais*, São Paulo, ABC, 2001, p.301-313.

27. GHRICI, M.; KENAI, S.; SAID-MANSOUR, M., Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement & Concrete Composites*, v.29, p.542-549, 2007.

28. KIM, J.; LEE,Y.; YI, S., Fracture characteristics of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, v.34, p. 507-519, 2004.

29. NASCIMENTO, M.R.; GEMELLI, E.; CAMARGO, N.H.A. Caracteização de argamassas de pastas de cimento com misturas de bentonita e de pó de carvão. In: 51º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis-SC, 2001. *Anais*. São Paulo, ABC, 2001, p.301-313.

30. CHEN, J.; JIANG, M., Long-term evolution of delayed ettringite and gypsum in Portland cement mortars under sulfate erosion. *Construction and Building Materials*. v.23, p.812-816, 2009.

31. TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L., Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, v.31, p. 683-693, 2001.

32. THOMAS, M.; FOLLIARD, K.; DRIMALAS, T.; RAMLOCHAN, T., Diagnosing delayed ettringite formation in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, v.38, p. 841-847, 2008.

CURING TIME INFLUENCE IN THE YOUNG MODULUS OF THE MORTARS MAKED WITH PORTLAND CEMENT

ABSTRACT

The Portland cement concrete is a one of the more used material in all the world, therefore its structure is very complicate. The concrete is a mixture of the mortar and aggregates. The properties of the concrete are basically due to the mortar properties. This way, is very important to study the concrete properties with depth. The aim of this work was to study the elastic modulus behavior with the curing time of the two mortar compositions 1:2 and 1:3, cured at 25°C in satured water atmosphere. The results showed that elastic modulus increase until a maximum value in eighth day, being that in the first three days this increasing it is more pronounced. The results analysis show that a great part of the hydration of the cement, with chemical bond formation responsible to stiffness of the mortar, happen in the first days of the curing time.

Key-words: Portland cement, mortar, concrete, cure, Young modulus.