



Análise comparativa do Módulo de elasticidade calculado segundo diferentes Normas

L. Cabral¹, E. Monteiro², P. Helene³.

¹ Universidade Católica de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

² Departamento de Engenharia Civil, UNICAP e UPE, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Civil, UNICAP e FUMEC, Brasil.

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v4i2.65>

Artículo recibido el 28 de enero de 2014, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 03 de abril de 2014.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2015 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2014.

© 2014 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 4, No. 2, Mayo – Agosto 2014, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97248, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Av. Zamná No. 295 entre 61 y 63 Fraccionamiento Yucalpetén, Mérida Yucatán, México, C.P. 97248, fecha de publicación: 30 de mayo de 2014.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

Este artigo avalia o módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto a partir de um estudo científico e experimental de dosagem que faz uso dos recursos do diagrama de dosagem do concreto. Também, compara os modelos de previsão do módulo de elasticidade estático a partir de uma dada ou conhecida resistência à compressão. Uma análise comparativa entre os valores previstos por algumas normas foi realizada, avaliando o nível de precisão e adequação das mesmas a resultados experimentais de casos reais. A ACI 318:2014 foi a norma que apresentou resultados mais próximos em relação a NBR 6118:2014 e em relação aos resultados experimentais. Já as normas EUROCODE – 2:2004, DIN 1045, a norma fib MODEL CODE 2010 superestimam os valores em relação aos resultados experimentais. O módulo de elasticidade dinâmico, medido através de ondas ultrassônicas, também foi comparado com os resultados experimentais obtido do ensaio de módulo estático, mostrando-se uma opção prática, rápida e não destrutiva de avaliar indiretamente o módulo de elasticidade estático do concreto.

Palabras claves: módulo de elasticidade; resistência à compressão; diagrama de dosagem; modelos de previsão.

ABSTRACT

This paper evaluates the suitability of the diagram of dosage of concrete in relation to the static and dynamic elasticity moduli. It also compares models of prediction of static modulus based on the compressive strength. A comparative analysis was carried out among experimental values and those predicted by some standards, evaluating the accuracy of the latter. The ACI 318:2014 was the standard that presented the closest results compared to NBR 6118:2014. On the other hand, the standards EUROCODE – 2:2004, DIN 1045. The fib MODEL CODE 2010 standard overestimated the values relative to the other standards. The dynamic elasticity modulus, measured by ultrasonic waves, was also compared to the static modulus, and it proved as a fast and non-destructive alternative route to evaluate the static elasticity modulus of concrete.

Keywords: modulus of elasticity; compressive strength; dosage diagram; prevision models.

Autor de contacto: Larissa Cabral (larissacabral@outlook.com)

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pinheiro e Santos, 2007 na preparação do concreto, com as misturas dos agregados graúdos e miúdos com cimento e água, tem início à reação química do cimento com a água, resultando gel de cimento, que constitui a massa coesiva de cimento hidratado. A reação química de hidratação do cimento ocorre com redução de volume, dando origem a poros, cujo volume é da ordem de 28% do volume total do gel.

Segundo Nunes, 2005 as propriedades do concreto, como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade em diferentes idades, dependem das características e proporções dos componentes do concreto e de sua interação, podendo variar consideravelmente de um concreto para outro, mesmo em concretos com um mesmo valor de resistência à compressão aos 28 dias.

De acordo com Almeida, 2012 o módulo de elasticidade é comumente obtido a partir de modelos empíricos ou por meio do ensaio de compressão simples que exige aparatos e cuidados especiais devido à pequena deformação do concreto.

A avaliação do módulo de Young ou módulo de elasticidade no ensaio de compressão se aplicaria apenas a materiais que obedecem à lei de Hooke, segundo a qual a deformação elástica de um sólido é proporcional à tensão aplicada.

Segundo Coutinho e Gonçalves, 1994 na medida do módulo de elasticidade admite-se linearidade entre a tensão e a deformação, porém esta depende da taxa de deformação ou de carga aplicada ao corpo de prova. Quanto maior a velocidade de aplicação de carga, maior será o módulo aparente de elasticidade. Por outro lado, para taxas muito lentas, o efeito elástico se superpõe aos plásticos devido à fluência, e o módulo aparente tende a diminuir.

Uma segunda possibilidade para determinação experimental do módulo de *Young* é por meio da realização de ensaios dinâmicos. Atualmente duas técnicas experimentais dinâmicas têm sido muito utilizadas: a da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através do material e a da frequência ressonante. A primeira técnica baseia-se na relação estabelecida por Rayleigh entre a velocidade de propagação do som em determinada amostra (material, forma e dimensões), sua massa específica e suas características elásticas (Malhotra e Sivasundaram, 1991).

2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Segundo Mehta e Monteiro, 2008 para se analisar o comportamento de estruturas que são submetidas a terremotos ou cargas de impacto, é mais apropriado utilizar o módulo dinâmico de elasticidade, que pode ser determinado mais precisamente por um ensaio ultrassônico.

Ainda, segundo o autor, os valores dos módulos de elasticidade utilizados nos cálculos para projetos de concreto são normalmente estimados a partir das expressões empíricas que supõem dependência direta do módulo de elasticidade com a resistência à compressão e massa específica do concreto.

Como primeira aproximação, isso faz sentido porque o comportamento de tensão-deformação dos três componentes do concreto, a saber – agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição na interface – seria, na verdade, determinado pelas suas resistências individuais, que, por sua vez, estão relacionadas à resistência última do concreto.

Porém, em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito. Segundo Shehata, 2005; Benetti, 2012 dentre os constituintes do material estudado, os agregados, principalmente os graúdos, tem uma grande influência no módulo.

Barbosa e Geyer, 2010 demostraram que o tipo de agregado graúdo e o nível de resistência adotada na dosagem do concreto são fatores que definem o resultado do módulo de elasticidade do concreto. Na Tabela 1 pode ser observado um quadro com os principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto.

Tabela 1: Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade (Battagin, 2008; Benetti, 2012)

Alguns fatores que influenciam os valores de E_c			
Agregados	Pasta	Zona de Transição	Execução da Estrutura
Natureza	Resistência	Porosidade	Adensamento
Módulo	Relação a/c	Composição	Cura
Proporção	Quantidade	Idade	Idade do carregamento
Quantidade	Idade	Resistência	Umidade
Forma	Ensaio		Temperatura
Textura	Corpos de prova		
	Aparelhagem		

2.1 Materiais Constitutivos

2.1.1 Cimento Portland. Segundo Mehta e Monteiro, 2008 o módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento é determinado por sua porosidade. Os fatores que controlam esta porosidade são: matriz da pasta de cimento, relação água/cimento, teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento. Há relatos na bibliografia de pastas de cimento hidratado com valores de módulo de elasticidade entre 7 e 48 GPa. Deve-se observar que esses valores são semelhantes aos módulos de elasticidade dos agregados leves.

2.1.2 Agregados. A explicação para a influência do agregado no valor do módulo, para concretos considerados normais, está na análise do diagrama tensão - deformação dos diferentes elementos que compõem o concreto, como mostra a Figura 1. Enquanto o agregado e a pasta de cimento apresentam relação tensão - deformação praticamente linear, o concreto, não apresenta esta mesma relação.

Esta não linearidade, de acordo com Neville, 2013 deve-se à presença da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, que possui vazios, concentração de cristais de hidróxido de cálcio e microfissuras, fatores esses que afetam o módulo de elasticidade, principalmente devido à natureza petrográfica do agregado, sendo que basaltos e diabásios fornecem os concretos de mais alto módulo, enquanto granitos, gnaisses, calcários, rochas alteradas e arenitos, fornecem baixos módulos.

2.1.3 Zona de transição. Para Mehta e Monteiro, 2008; Leal, 2012 os vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição na interface do que na matriz da pasta; por isso tem um papel importante na determinação das relações tensão-deformação do concreto.

2.1.4 Parâmetros de ensaio. De acordo com Mehta e Monteiro, 2008 independentemente das dosagens ou do tempo de cura, corpos de prova de concreto que são ensaiados em condições úmidas apresentam módulo de elasticidade cerca de 15% mais alto do que os corpos de prova correspondentes ensaiados em condição seca. É importante observar que o inverso ocorre com a resistência à compressão, que é maior quando as amostras estão secas.

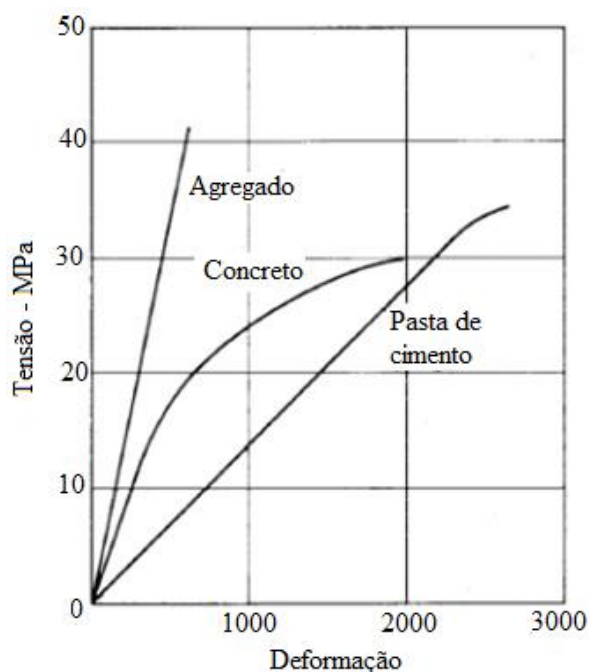


Figura 1. Comportamento típico tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto (Neville, 2013).

2.2. Tipos de Módulo de Elasticidade

2.2.1 Módulo de Elasticidade Estático (MEE). Neto e Helene, 2002 definem módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido como módulo de elasticidade tangente inicial. Do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e $0,3 f_c$ e ao módulo de elasticidade secante a $0,3 f_c$, como se fossem equivalentes. Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_{ci} , geralmente expresso em GPa. Este valor pode ser obtido pelo método de ensaio brasileiro descrito na ABNT NBR 8522: 2008.

Outro tipo de módulo é módulo de deformação, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c , indicado por E_c . Ainda de acordo com Neto e Helene, 2002 há também o módulo de deformação, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado.

A Figura 2 apresenta os três tipos de determinações do módulo de elasticidade, sendo a declividade da primeira reta caracterizando a declividade do módulo tangente inicial, a declividade da segunda correspondendo ao módulo secante e a declividade da reta traçada tangente a qualquer ponto da curva tensão - deformação corresponde ao módulo cordal.

2.2.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED). O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através de métodos não destrutivos. Malhotra e Sivasundaram, 1991; Andrade, 1997 comenta que duas técnicas experimentais dinâmicas têm sido muito utilizadas: a da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através do material (corpos de prova de concreto) e a da frequência ressonante. A primeira técnica baseia-se na relação estabelecida por Rayleigh entre a velocidade de propagação do som em determinada amostra (material, forma e dimensões), sua massa específica e suas características elásticas.

O segundo método dinâmico baseia-se na determinação da frequência natural de vibração do elemento a ser analisado quando o mesmo é submetido a vibrações longitudinais ou transversais ou torcionais. Utilizando-se o valor da frequência natural de vibração, conhecendo-se a massa e a

geometria do corpo de prova, pode-se estimar o módulo de elasticidade dinâmico (Malhotra e Sivasundaram, 1991; Almeida, 2012).

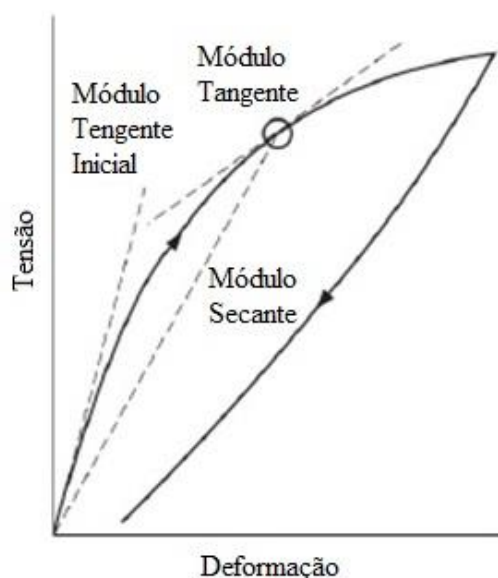


Figura 2. Diagrama tensão x deformação do concreto para compressão simples (Neville, 2013)

Assim, segundo Canesso; Correia; et al. 2008, o módulo dinâmico (Tabela 2) que corresponde a uma deformação instantânea muito pequena é dado aproximadamente pelo módulo tangente inicial que é o módulo tangente para uma linha traçada a partir da origem.

Tabela 2. Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de ultra-som (Evangelista, 2002; Benetti, 2012).

Parâmetro	Normas			
	NM58/1996 ABNT NBR8802:2013	RILEM NDT1/1972	BS1881: Part 203:1986	ASTM C597/1983
Frequência de Ultrassom	Acima de 20KHz	20 a 200KHz	20 KHz a 150 KHz	10 KHz a 150 KHz
Superfície	Seca ao ar, limpa e plana	Plana	Seca ao ar, limpa e plana	Seca ao ar, limpa e plana
Área de ensaio para verificar os elementos estruturais grandes	1m ²	-	-	-
Distância entre os transdutores	Precisão de $\pm 1\%$	Precisão de $\pm 1\%$	Precisão de $\pm 1\%$	Precisão de $\pm 0,5\%$
Medições de velocidade	Precisão de $\pm 1\%$		Precisão de $\pm 0,5\%$	Precisão de $\pm 0,5\%$

Pesquisas feitas na literatura mostraram que em setembro de 2008, a Associação Brasileira de Normas Técnicas publicou a NBR 15630, que prescreve os procedimentos de ensaios para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica

para argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos. Esta norma possui o procedimento similar ao da norma britânica BS – 1881 parte 203 (1986), utilizando a equação 1:

$$E_d = \rho \cdot V^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (1)$$

Onde:

ρ = densidade de massa no estado endurecido do concreto (kg/m^3);

V = velocidade que a propagação da onda ultrassônica leva para percorrer o corpo de prova de concreto em seu sentido longitudinal (em km/s);

ν = coeficiente de Poisson, que segundo Callister, 2002 é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando um determinado corpo de prova é submetido a uma carga em seu sentido axial. Esse coeficiente pode variar entre 0,10 a 0,20.

O ensaio não destrutivo é obtido através da equação: $\nu = \frac{\Delta s}{\Delta t} (\text{km/s})$, onde Δs é a altura de corpo

de prova (em km); e Δt (em s) é o tempo que a onda se propaga com relação a distancia Δs , que é a altura do corpo de prova. Dessa forma, calcula-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica obtida através do equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), que possui frequência de 54 hz, como ilustra as Figura 3 – (A) e (B).



Figuras 3. (A) e (B). Equipamento e calibração PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating tester)

2.2.3 Estimativa do Módulo de Elasticidade através dos modelos de previsão. Atualmente, existem vários modelos de previsão do módulo de elasticidade tangente inicial ou do módulo secante, baseado na resistência à compressão e massa específica do concreto. Poucos modelos levam em conta o tipo de agregado, o que pode acarretar em erros grosseiros de previsão (Neto e Helene, 2002). Assim, alguns modelos de previsão do módulo de elasticidade foram selecionados: A Tabela 3 relaciona todos os modelos de previsão estudados.

Cabe salientar que segundo Silva, 1997 os resultados encontrados, usando essas expressões conduzem, algumas vezes, a valores pouco precisos, o autor comenta que os valores vão ser tão próximos do real quanto mais eles se aproximarem dos materiais, do tipo de mistura, da composição do concreto, das condições de ensaio, daqueles utilizados nos estudos experimentais.

Tabela 3. Expressões para estimativa do módulo de elasticidade segundo modelos de previsão

NORMA	MÓDULO TANGENTE	Observações
ACI 318:2014*	$E_c = \omega_c^{1,5} \cdot 33 \cdot f_c^{1/2} \text{ (MPa)}$ para ω_c entre 1400 e 2500 kg/m ³ $E_c = 57,000 \cdot f_c^{1/2} \text{ (MPa)}$ para concreto de massa específica normal	E_c = módulo de elasticidade estático secante a 0,45 de f_{ck} , em MPa; f_c = resistência a compressão aos 28 dias, em MPa, obtida de cilindros;
fib MODEL CODE 2010	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse; $\alpha_E = 0,9$ para calcário e $\alpha_E = 0,7$ para arenito
ABNT NBR 6118:2014	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ para f_{ck} de 20MPa a 50MPa $E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$ para f_{ck} de 55MPa a 90MPa	
EUROCODE – 2:2004	$E_c = 1,05 \cdot E_{cm} \text{ (Equação 6)}$ $E_c(t) = 1,05 \cdot \left(\exp \left\{ - \left[1 - \left(\frac{t}{t_0} \right)^{0,5} \right] \right\} \right)^{0,3} \cdot E_{cm}$	Onde $E_{cm} = 22 \cdot ((f_{ck}+8)/10)^{0,3}$
DIN - 1045	$E_c = 6170 \cdot (f_c)^{1/2}$ para concreto de massa específica normal	

*item R19.2.2.1 traz a definição de E_c como a inclinação da reta traçada a partir da origem até a tensão de compressão de $0,45 \cdot f_c$ e que os valores de módulo de elasticidade obtidos através de ensaios podem variar de 80% a 120% dos valores previstos.

3. EXPERIMENTO

Para o presente estudo foram desenvolvidas dosagens de concreto tanto para concreto de consistência plástica como para o concreto auto adensável (SCC), adotando o método de dosagem IBRACON (Bernardo Tutikian & Paulo Helene. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. São Paulo, Capítulo12 do livro editado por Geraldo Isaia “Concreto: Ciência e Tecnologia”. IBRACON, 2011. P.415 a 451).

Os materiais utilizados foram da Região Metropolitana do Recife/PE: areia quatzosa; brita de granito tensionado, água potável do abastecimento público e cimento CP II E. Após a execução dos traços foram feitos ensaios de resistência mecânica e ensaio ultrassônico, com posterior estudo de módulo de elasticidade estático e módulo dinâmico.

Para análise dos módulos os seguintes fatores foram verificados a fim de corroborar suas influências:

- Diferentes consistências do concreto fresco (plástico e auto adensável),
- Diferentes resistências à compressão (20 MPa a 50 MPa para 28 dias),

3.1 Caracterização dos Materiais

Foram utilizados os seguintes materiais para desenvolvimento das dosagens de concreto:

- Cimento Portland CP II E 40

As características físicas e mecânicas estão de acordo com a ABNT NBR 11578:1991 – Cimento Portland Composto Especificação.

- *Agregados.* Foi utilizado um agregado miúdo natural, de composição quartzosa, extraído do rio, e seco ao ar. O agregado graúdo usado para a produção do concreto foi de composição granítica. Ambos atendem à ABNT NBR 7211:2005.
- *Água.* Foi utilizada água potável do abastecimento da Compesa (Companhia Pernambucana de Saneamento). De acordo com a norma ABNT NBR 15900:2009, a água de abastecimento público é adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada.
- *Aditivo.* Para o concreto auto adensável foi utilizado aditivo hiperplastificante. A intenção deste aditivo foi conferir propriedades que não podem ser obtidas apenas pelo uso correto dos materiais disponíveis.

3.2 Estudo de dosagem

O método de dosagem utilizado foi do IBRACON. As misturas das dosagens de concreto plástico (Figura 4) foram feitas de modo a obter 3 traços. Inicialmente, realizou-se o Traço 1:5 (traço intermediário) a fim de se descobrir o teor ótimo de argamassa seca, fixando o abatimento do tronco de cone em 100 ± 20 mm. Após, foram feitas mais 2 misturas variando o a/c e fixando o abatimento de acordo com a ABNT NBR NM 67:1998. A Tabela 4 mostra todos os traços produzidos.

Depois, realizou-se um segundo momento para o concreto auto adensável (SCC), também 3 dosagens. Utilizando o mesmo processo do concreto plástico. Contudo, fixando o espalhamento em 650 ± 50 mm (Figura 5). Para o SCC seguiu-se a ABNT NBR 15823-2:2010. A Tabela 5 mostra os traços confeccionados.

Para todos os traços de concreto plástico e auto adensável, o teor ótimo de argamassa (cimento + areia)/(cimento+areia+brita) foi mantido constante em 52% e 63%, respectivamente.

Para todas as dosagens desenvolvidas foram moldados corpos de prova nas dimensões com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, de acordo com norma da ABNT NBR 5738:2003.

Os concretos foram ensaiados quanto a resistência à compressão simples, em prensa com capacidade para 100 toneladas, com 5 corpos de prova, para cada idade de 3, 7, 28 e 91 dias, com as tolerancias velocidade de carga, segundo a ABNT NBR 5739:2007.

De acordo com cada idade foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade Tangente Inicial, onde através dos dados de tensão de ruptura à compressão pode-se calcular um plano de carga variando de 0,5 MPa até 30% da carga última, sendo utilizados 3 corpos de prova irmãos, seguindo a recomendação da ABNT NBR 8522:2008.

A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida, segundo a ABNT NBR 5738:2003 e especificações da ABNT NBR 9479:2006.

Para o ensaio dinâmico, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e retificados, de acordo com as datas dos ensaios. Após secos, aplicou-se uma camada de vaselina nas superfícies planas do emissor e do receptor do equipamento, permitindo o acoplamento dos mesmos nos corpos de prova. Registrou-se então a propagação da onda, em μ s, em cada corpo de prova. O ensaio foi posicionado no modo de transmissão direta. E, o mesmo foi calibrado a cada 5 exemplares ensaiados.

A ABNT em 2008 publicou o ensaio de módulo dinâmico para argamassa (NBR 15630). Até então não foi elaborado para o segmento do concreto. Assim, para aplicar o experimento ao concreto procurou-se uma norma que tivesse os mesmos procedimentos similares ao da norma brasileira de argamassa. Logo, a norma britânica BS – 1881 part 203(1986), foi a mais adequada.



Figura 4. Mistura de dosagem do concreto plástico



Figura 5. Medida do espalhamento do concreto auto adensável

Tabela 4. Dosagem dos traços de concreto plástico

Traços de Concretos Frescos			
Componentes	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento (kg/m ³)	536	357	303
Areia (kg/m ³)	579	758	801
Brita (kg/m ³)	1029	1029	1019
Água (kg/m ³)	231	218	227
a/c (kg/kg)	0,45	0,60	0,75
m (kg/kg)	3	5	6
“slump” (mm)	100	100	105
Massa específica (g/cm ³)	2,374	2,362	2,350
Traço unitário em massa	1,0 : 1,08 : 1,92	1,0 : 2,12: 2,88	1,0 : 2,64 : 3,36

Tabela 5. Dosagem dos traços de concreto auto adensável (SCC)

Traços de Concretos Frescos			
Componentes	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento (kg/m ³)	522	343	288
Areia (kg/m ³)	793	955	983
Brita (kg/m ³)	773	762	747
Água (kg/m ³)	235	209	216
Aditivo (l)	2,1	2,7	2,3
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
m (kg/kg)	3	5	6
Espalhamento (mm)	650	650	690
Massa específica (g/cm ³)	2,323	2,270	2,235
Traço unitário em massa	1,0 : 1,52 : 1,48	1,0 : 2,78: 2,22	1,0 : 3,41 : 2,59

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os Gráficos 1, 2, 3, 4, 5, e 6 representam os resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade tangente inicial e do módulo dinâmico para os concretos de consistência plástica e auto adensável, respectivamente.

É possível observar nos resultados dos gráficos que independente da consistência os resultados crescem uniformes.

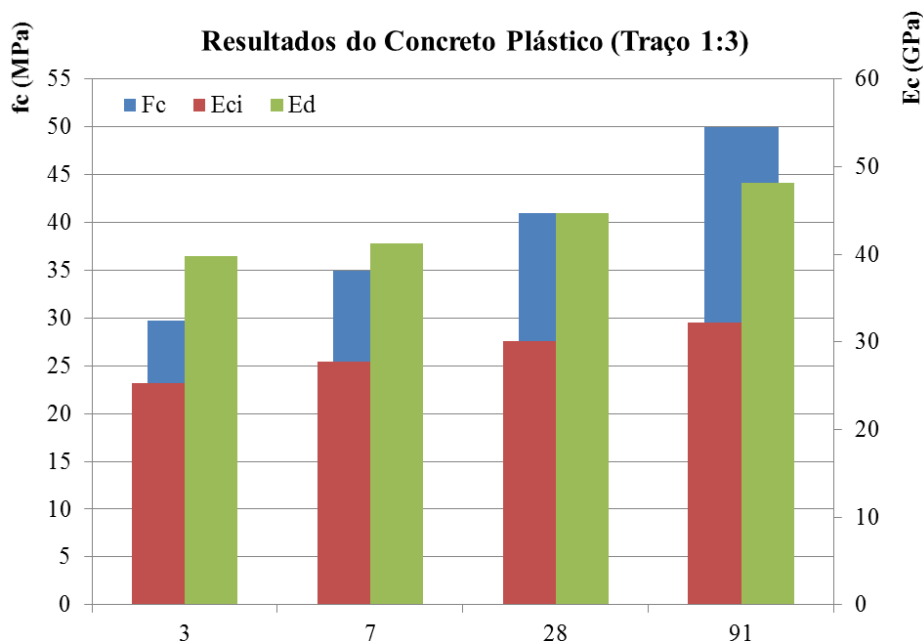


Gráfico 1. Resultados do Concreto de Consistência plástica para o Traço 1:3

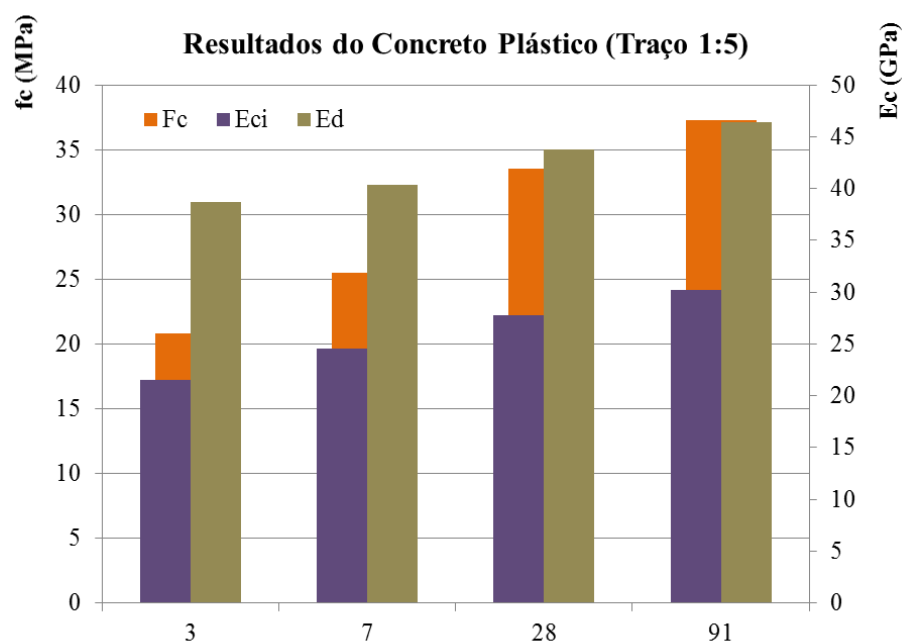


Gráfico 2. Resultados do Concreto de Consistência plástica para o Traço 1:5

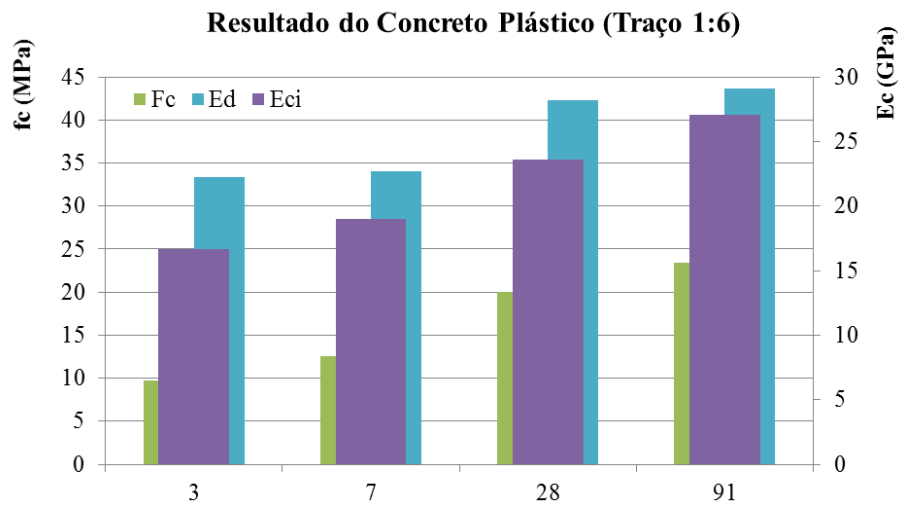


Gráfico 3. Resultados do Concreto de Consistência plástica para o Traço 1:6

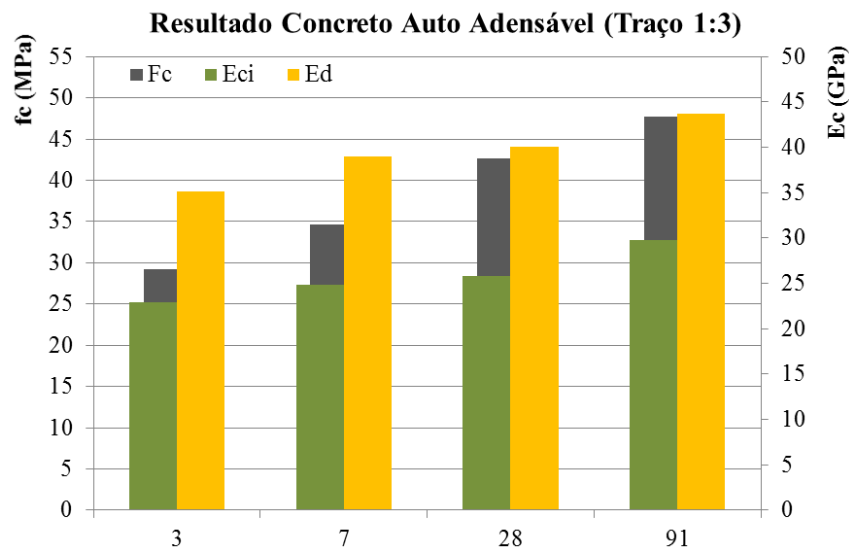


Gráfico 4. Resultados do Concreto auto adensável para o Traço 1:3

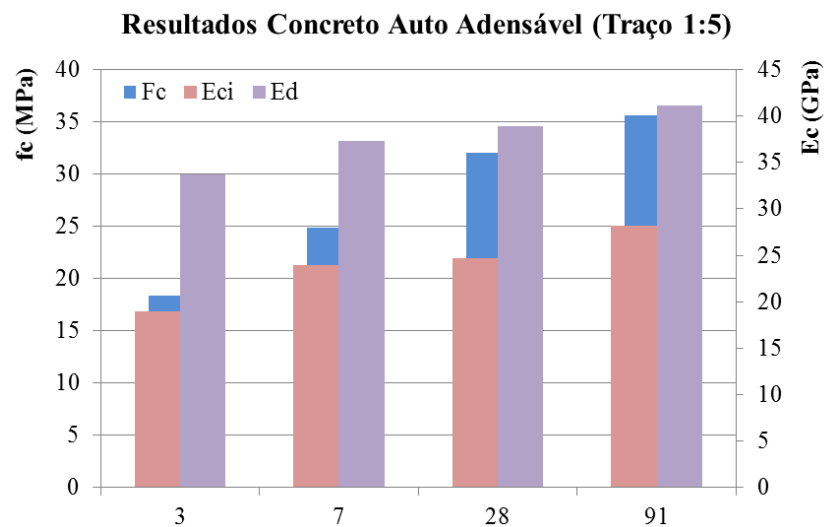


Gráfico 5. Resultados do Concreto auto adensável para o Traço 1:5

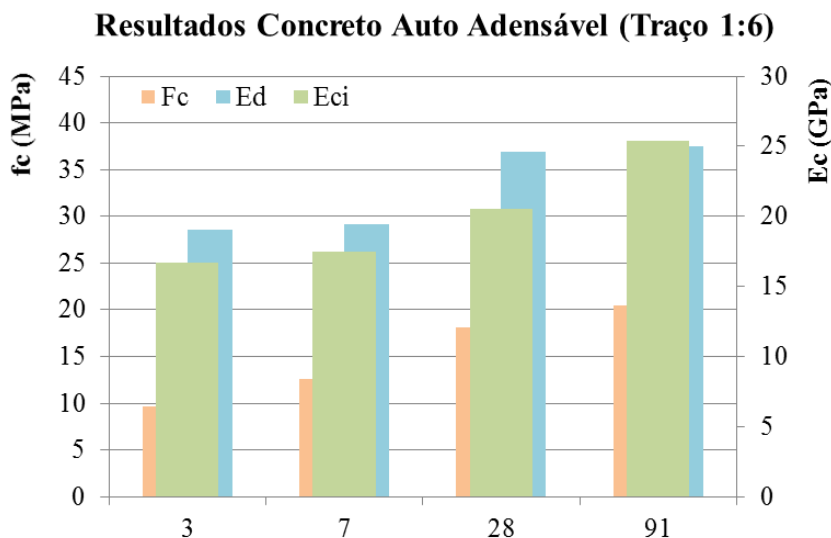


Gráfico 6. Resultados do Concreto auto adensável para o Traço 1:6

Segundo Neto e Helene, 2002 tanto para o estudo do módulo de elasticidade estático tangente inicial como para o módulo de elasticidade dinâmico é necessário analisar alguns fatores que podem influenciar os ensaios como: natureza e diâmetro nominal do agregado graúdo, velocidade de aplicação da carga, dimensão dos corpos de prova, temperatura do ensaio, entre outros.

De acordo com os resultados obtidos foram feitos diagramas de dosagem, tanto para resistência à compressão como para módulo de elasticidade tangente inicial e dinâmico, segundo Terzian e Helene, 1993. Estes são apresentados com suas respectivas equações de Lei de ABRAMS, Lei de LYSE e Lei de MOLINARI obtidas através da regressão linear, como demonstram as Figuras 6, 7, 8.

4.1 Resistência à compressão

A Figura 6 apresenta o diagram de dosagem, ao avaliar o primeiro quadrante é possível caracterizar a Lei de Abrams, na qual esta lei determina que para um mesmo grau de hidratação da pasta de cimento a resistência da pasta depende essencialmente da relação água/cimento.

Dessa forma, o estudo foi feito para dois tipos de consistência de concreto, um plástico e outro auto adensável, com os mesmos materiais de mesma natureza, podendo-se concluir, segundo esta lei que independente da consistência a relação água/cimento é inversamente proporcional a resistência à compressão.

4.2 Módulo de Elasticidade Estático (MEE)

Em análise da Figura 7, primeiro quadrante, verifica-se o comportamento do módulo de elasticidade tangente inicial a origem do concreto. A quantidade de agregado, tipo e quantidade de cimento, interface pasta agregado e parâmetros de ensaio são considerados fatores que interferem no MEE. Além desses, pode-se considerar a consistência dentre o mais importante.

Dessa forma, observou-se maiores resultados de módulo de elasticidade estático para o concreto de consistência plástica. O que pode ser explicado, pois a quantidade de argamassa presente no concreto plástico é razoavelmente menor se comparando ao SCC.

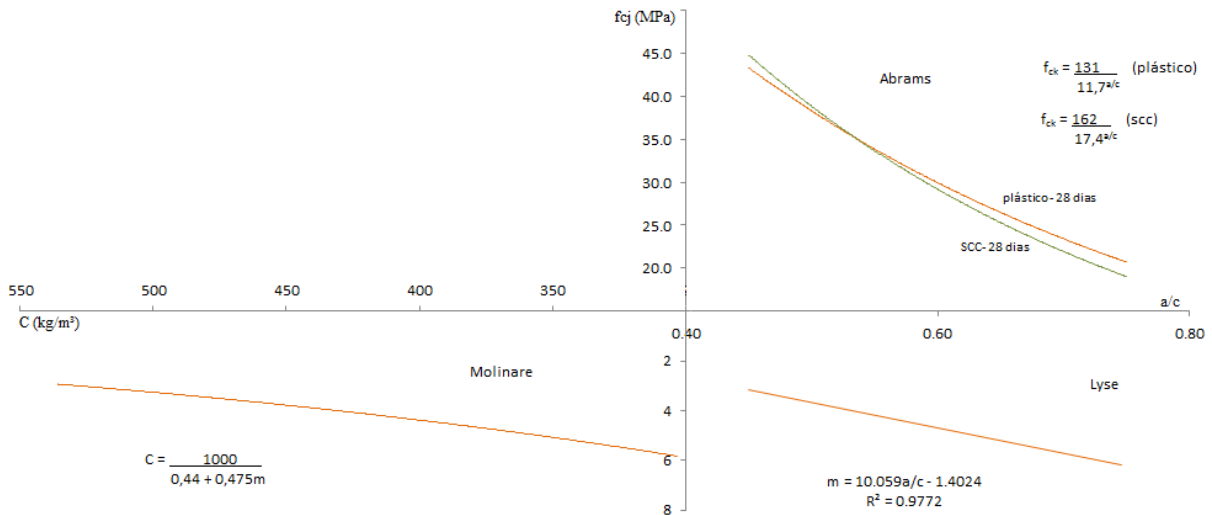


Figura 6. Diagrama de dosagem para resistência à compressão de concreto plástico e auto adensável (abatimento = constante)

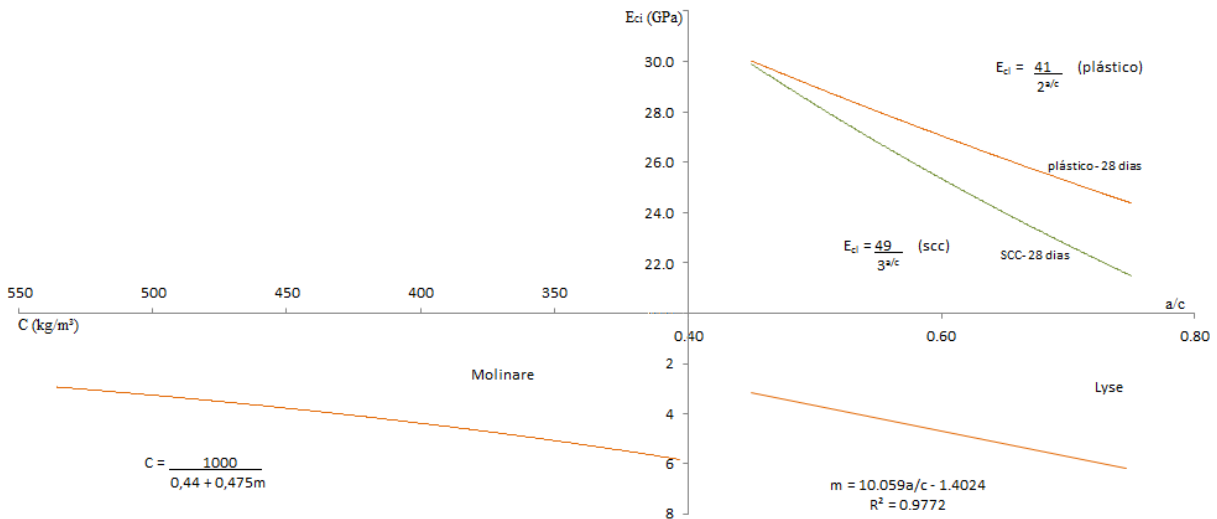


Figura 7. Diagrama de dosagem para Módulo de Elasticidade Estático Tangente Inicial de concreto plástico e auto adensável (abatimento = constante)

4.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED)

A Figura 8 representa a análise do módulo de elasticidade dinâmico, que em parte tem suas conclusões parecidas com o módulo de elasticidade estático, no tocante à consistência. Contudo, para obtenção do valor dos módulos vale considerar que ele apresenta vantagens e desvantagens. A determinação do módulo de elasticidade estático apresenta desvantagens devido à interferência do aparato de ensaio nos resultados. O extensômetro pode se desprender devido a fissuras no corpo de prova, a medição do deslocamento pode estar considerando inclusive a deformabilidade dos topos dos corpos de prova. Além do mais, certos aspectos da curva da tensão deformação não são devidos às propriedades intrínsecas do concreto, mas às propriedades do equipamento de ensaio, que assim poderiam influenciar as medidas realizadas (Canesso; et al., 2008).

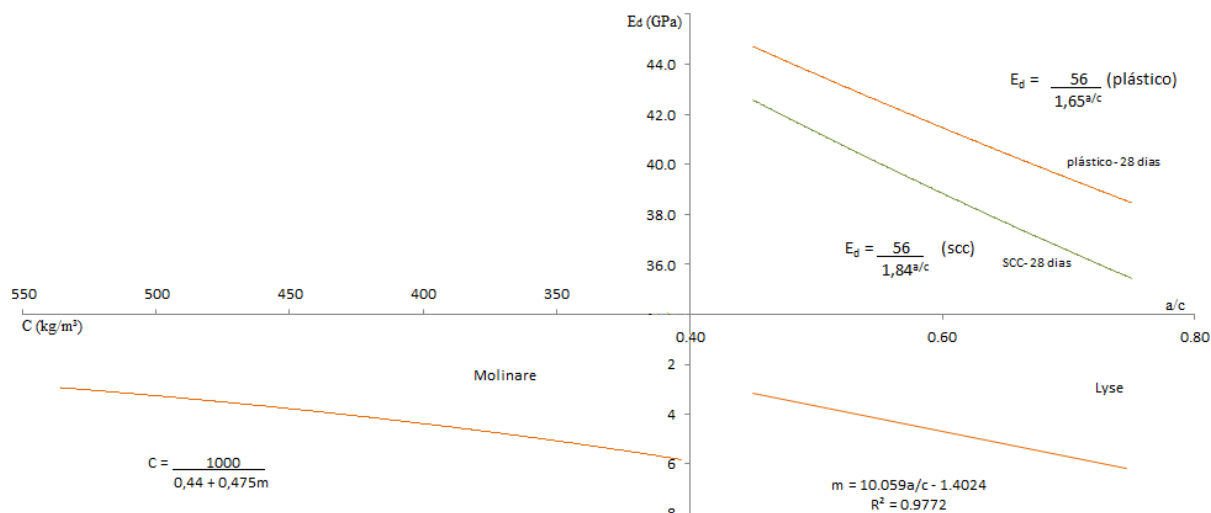


Figura 8. Diagrama de dosagem para Módulo de Elasticidade Dinâmico de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte)

4.4 Análise do MEE x MED

A relação entre MEE com MED pode ser de 0,6 aumentando até 0,8 com o crescimento da resistência independente da consistência do concreto.

Conforme, Mehta e Monteiro, 2008; Benetti, 2012, relata que o módulo de elasticidade dinâmico é maior em 20, 30 ou 40% do módulo de elasticidade estático para concretos de alta, média e baixa resistência, devido à deformação instantânea no concreto durante o ensaio dinâmico ser muito pequena, não induzindo nenhuma microfissura, nem ocorrendo fluência, ao contrário do ensaio estático, que mede as deformações resultantes do carregamento.

Segundo PUNDIT, 1998; GUIMARÃES, 2006 o fator de correlação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico é de 1,5, ou seja, se o valor do módulo estático é 22 GPa o módulo dinâmico corresponde está próximo a 32 GPa.

4.5 Análise dos Modelos de Previsão dos Módulos de Elasticidade

Diversos modelos de previsão do módulo de elasticidade foram estudados, tanto em normas nacionais como em estrangeiras. Estes modelos têm o propósito de economizar tempo e dinheiro consumido na execução deste ensaio, através da estimativa do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão.

A Figura 9 mostra os resultados calculados pelos modelos de previsão para 28 dias. Vale salientar que esses modelos de previsão são feitos para concretos normais não para concretos de alto desempenho.

- O módulo de elasticidade estático varia de acordo com a mudança da consistência. Os resultados da ABNT NBR 8522:2008 para consistência auto adensável foi menor em relação aos valores do concreto de consistência plástica para ABNT NBR 8522:2008.
- Comparando os resultados das normas brasileiras, verifica-se que os valores obtidos na ABNT NBR 6118:2014, superestimam os da norma ABNT NBR 8522:2008. Dessa forma, ao se comparar a relação destas duas normas conclui-se que o módulo experimental obtido pela ABNT NBR 8522:2008 é 0,8 para SCC e 0,9 para concreto plástico comparado aos modelos da ABNT NBR 6118:2014.
- As normas Eurocode – 2:2004 e DIN 1045 possuem características muito parecidas. Contudo, seus valores estão superestimados em relação a ABNT NBR 8522:2008. A relação entre a Eurocode -2:2004 e NBR 8522:2008 para SCC e concreto plástico é de 0,7 e 0,8, respectivamente. Assim como para a norma alemã a relação é de 0,6 e 0,7.

- A norma americana ACI 318:2014 está com seus resultados superestimados em relação as normas brasileiras. Entretanto, comparando com os demais modelos de previsão de estudos os valores são os mais próximos.
- A *fib* Model Code 2010 está com seus valores superestimados em relação a todos os modelos de previsão estudados. Desta forma, seus resultados não são muito confiáveis. A relação entre a *fib* e as normas brasileiras estudadas é 0,4.

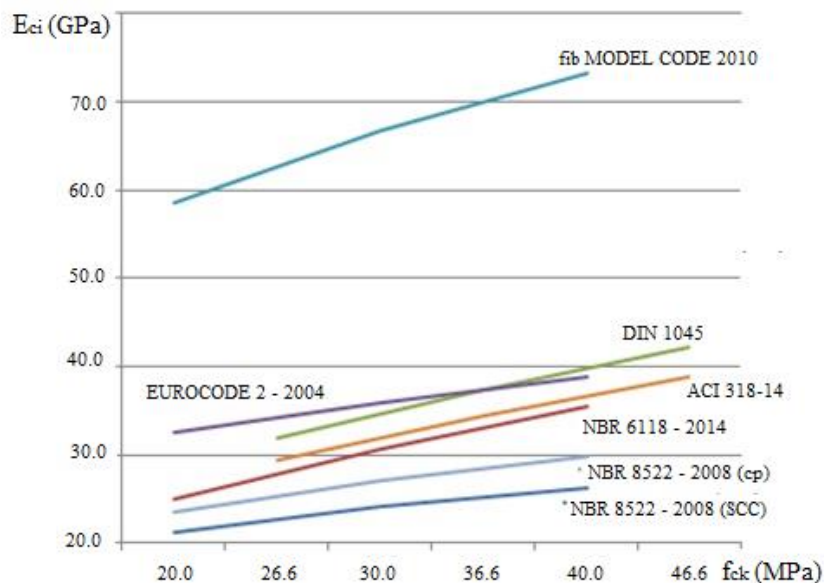


Figura 9. Módulo de elasticidade Estático Tangente Inicial de acordo com os modelos de previsão (28 dias)

5. CONCLUSÃO

- ✓ A partir da revisão bibliográfica e do estudo experimental realizado para esta pesquisa é possível concluir que para mesmos materiais e uma mesma relação água/cimento, em massa, para diferentes consistência do concreto fresco e diferentes consumo de materiais por m³, a resistência à compressão mantem-se igual;
- ✓ O Módulo de elasticidade, ao contrário, varia segundo a consistência do concreto fresco mesmo que os concretos sejam produzidos com mesmos materiais e mesma relação a/c;
- ✓ O módulo de elasticidade estático tangente inicial a origem, assim como o módulo dinâmico, foram sempre maiores para o concreto de consistência plástica em comparação ao concreto auto-adensável;
- ✓ A correlação encontrada neste trabalho de 1,5 entre o módulo de elasticidade estático tangente à origem e o módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom concorda com PUNDIT, 1998; GUIMARÃES, 2006.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro, 2014.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. NBR 8802: Concreto endurecido — Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro. 2013.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. NBR 9479: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. NBR 11578: Cimento Portland Composto Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15823-2: Concreto auto-adensável. Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15900-2: Água para Amassamento de Concreto. Parte 2 Coleta de amostras e ensaios. Rio de Janeiro, 2009.
- ACI - 318 - Building Code Requirements for Structural Concrete, 2014.
- Almeida, S. (2012), “*Análise do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do Concreto de Cimento Portland através de Ensaio de Compressão Simples e de Frequência Ressonante*”. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 213p.
- Andrade, W. (1997), Laboratório de Concreto e Departamento de Apoio e Controle Técnico – “*Concretos: Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com rolo (Ensaio e Propriedades)*”. Ed.PINI. São Paulo.
- Barbosa, I.L.S.; Geyer, A.B. (2010), “*Influência dos agregados graúdos da Região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto*” in: 52º Congresso Brasileiro de Concreto – IBRACON.
- Battagin, I. (2008), Módulo de Elasticidade do Concreto – “*Normalização, fatores de influência e interface com o pré-moldado*”. Concrete Show.
- Benetti, J. (2012), “*Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto*”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.
- British Standard Association. (1986), “*BS 1881 Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*”.
- Callister, W. D. (2000), *Ciências e engenharia de materiais: uma introdução*. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos.
- Canesso, F.; Correa, E.; Silva, A.; Aguilar, M.; Cetlin, P. (2008), *Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático do Concreto*. 18º CBECiMat. Porto de Galinhas, Brasil.
- Canovas, M. F. (1988), *Patologia e Terapia do Concreto Armado* – Coordenação técnica L. A . Falcão Bauer, São Paulo, PINI.

- Castro, A.; Libório, A.; Pandolfelli, V. A (2011), *Influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional*.
- Coutinho, A.S.; Gonçalves, A. (1994), *Fabricação e propriedades do concreto*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Vol. III, Lisboa.
- Cunha, J.C. (2000), “*Módulo de Elasticidade do Concreto*” – Informador das Construções, Ed.1424, Belo Horizonte - MG, julho.
- DIN – 1045 (2013), Reinforced and Prestressed Concret Design.
- EUROCODE -2 Design of concrete structures – Part 1 – 1: General rules and rules for building, 2004.
- Evangelista, A.C.J. (2002), *Avaliação da Resistência do Concreto usando diferentes ensaios não destrutivos*. 2002. 219p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- Fib Model Code – Comitê Euro Internacional do Betão. 2010
- Guimarães, C. (2006), *Avaliação do uso da água Magnetizada na Produção de Concretos em Centrais*. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG.
- Helene, P. (1998), *Estudo da Variação do Módulo de Elasticidade do Concreto com a Composição e Características do Concreto Fresco e Endurecido*. Relatório Técnico do Convênio EPUSP-CPqDCC/ABCP, n.10.122.
- Helene, P. (2002), *Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade do Concreto*. In: IBRACON 44º Congresso Brasileiro do Concreto.
- Leal, A. (2012), *Investigação Experimental do Módulo de Elasticidade nos concretos produzidos em Brasília*. Dissertação de Mestrado. Brasília.
- Malhotra, V. M.; Carette, G. G.; Bilodeau, A.; Sivasundaram, V. (1991), Some Aspects of Durability of High – Volume ASTM Class F (low – calcium) Fly Ash Concrete, ACI Special Publication, (V. M. Malhotra, ed.) SP 126:65 – 82.
- Mehta, P.; Monteiro, P. (2008), *Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 3º edição, Ed Ibracon.
- Neville, M. A. (2013), *Tecnologia do Concreto*, São Paulo, 2º edição, PINI.
- Vasconcelos, A.; Giamusso, S. (2009), *O Misterioso Módulo de Elasticidade*.
- Niemczewski, J.S. (2014), *Agregados para Argamassa e Concreto*. Universidade de Caxias do Sul (UCS). Laboratório de Materiais de Contrução. Porto Alegre.
- Nunes, F. W. G. (2005), *Resistência e Módulo de Elasticidade de Concretos Usados no Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.
- Pinheiro, L.; Muzardo, C.; Santos, S. (2007), *Apostila: Fundamentos do Concreto e Projetos de Edifícios*. Universidade de São Paulo, São Carlos, 380p, maio.
- Shehata, L.D. (2005), *Deformações instantâneas de concreto*. In: ISAÍIA, G.C. (Ed). *Concreto: Ensaio, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON.
- Silva, E. F. (1997), *Concreto de Alto Desempenho: Estudo de Propriedades Mecânicas*. 1997. 166 f. Dissertação (Mestre em estruturas) Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília.
- Terzian, P.; Helene, P. (1993), *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. 383p.