

Natureza do trabalho: Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido.

Interessado: Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP
Eng. Mário William Esper

sumário

1. INTRODUÇÃO
2. MODELOS de PREVISÃO do MÓDULO de ELASTICIDADE
 - 2.1 Texto da NB 1 da ABNT de 1978
 - 2.2 Texto proposto para a NB 1 da ABNT de 1997
 - 2.3 Texto do ACI 318 de 1995
 - 2.4 Texto do CEB / FIP Model Code 90, de 1993
 - 2.5 Modelo em paralelo
 - 2.6 Modelo em série
3. METODOLOGIA
 - 3.1 Programação do experimento
 - 3.2 Materiais
 - 3.3 Resultados
4. ANÁLISE e DISCUSSÃO dos RESULTADOS
 - 4.1 Estudo de dosagem
 - 4.2 Comparação entre módulo inicial e secante
 - 4.3 Correspondência entre resistência e módulo
 - 4.4 Módulo de elasticidade em função da resistência à compressão
 - 4.5 Comparação dos resultados com os modelos disponíveis
5. PROPOSTA de TEXTO para NORMALIZAÇÃO
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. INTRODUÇÃO

Considerando a necessidade de calibragem, atualização e revisão da NB 1 da ABNT (NBR 6118 / 78) Projeto e Execução de Obras de Concreto, esta Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com o apoio do Instituto Brasileiro do Concreto IBRACON e principalmente com o apoio do Comitê Brasileiro de Normalização de Cimento, Concreto e Agregados, CB-18 da ABNT, firmou Convênio de Cooperação Técnica com a Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP, para estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido.

Esse estudo teve como objetivo obter uma correspondência entre módulo de elasticidade e outras propriedades do concreto, principalmente resistência à compressão, que possam ser introduzidas no futuro texto atualizado da NB 1, e que, ao mesmo tempo, reflita as influências dos diferentes materiais nacionais.

Muitas são as variáveis que podem interferir no resultado do módulo de elasticidade do concreto.

Dentre elas, infelizmente por falta de tempo e recursos, não foram consideradas neste estudo:

- diferentes naturezas do agregado graúdo,
- diferentes diâmetros nominais do agregado graúdo,
- diferentes estado de umidade dos corpos de prova no momento do ensaio,
- diferentes velocidades de aplicação da carga ou da deformação,
- diferentes dimensões dos corpos de prova,
- diferentes temperaturas de ensaio.

Por outro lado contemplou-se as seguintes variáveis:

- diferentes relações água/cimento;
- diferentes consistências do concreto fresco,
- diferentes volumes de pasta por metro cúbico de concreto,
- diferentes resistências à compressão, e
- diferentes idades.

Evidentemente num estudo previsto para apenas um ano, não seria possível nem viável avaliar de forma consistente todas as variáveis em jogo, principalmente ensaiar todos os agregados disponíveis no país.

Tendo em vista essa dificuldade, este pesquisador preparou e entregou ao IBRACON, em fins de 1995, um plano geral de pesquisa de módulo que deveria ser implementado em diversos laboratórios do país, aliviando a carga de trabalho no

laboratório da USP e obtendo uma melhor visão da situação nacional. Portanto este estudo representa uma parcela de contribuição de um projeto nacional bem mais amplo.

Os resultados obtidos demonstraram a importância da consideração da proporção relativa entre o volume de pasta e o de agregados no traço do concreto, além da grande influência da relação água/cimento, da consistência do concreto fresco e da idade.

2. MODELOS de PREVISÃO do MÓDULO de ELASTICIDADE

O texto do CEB /FIP Model Code 90, p.39 e seguintes, define claramente o que se deve entender por módulo de elasticidade do concreto, indicado com a notação E_{ci} , ou seja, módulo de elasticidade tangente à origem ou inicial. Esse valor é o valor utilizado pelo CEB / FIP Model Code 90 em todos os demais modelos de comportamento indicados nos diagramas tensão *versus* deformação para estados de tensão uniaxial ou multiaxial e também no caso de previsão de deformação lenta.

Por outro lado, depreende-se do texto do CEB / FIP Model Code 90 que o módulo tangente à origem ou inicial, é perfeitamente equivalente ao módulo secante a $0,3f_c$ ou cordal entre $0,5 \text{ MPa}$ e $0,3f_c$.

Em geral a correspondência que se adota entre módulo inicial (E_{ci}) e o módulo secante (E_c), utilizado apenas no caso específico de uma análise elástica do comportamento estrutural, é de $E_c = (0,85 \text{ a } 0,90) \cdot E_{ci}$.

Apesar que o módulo de elasticidade normalmente considerado nas normas de projeto e dimensionamento de estruturas de concreto, E_{ci} e E_c , sempre são referidos à idade de 28 dias, neste estudo considerou-se oportuno estudar outras idades.

Uma vez que o diagrama tensão vs deformação específica do concreto não é linear nem tem um comportamento elástico perfeito, define-se pelo menos três módulos de elasticidade, quando em compressão uniaxial (sem confinamento), em corpos de prova cilíndricos de diâmetro 150mm e altura 300mm:

- o **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, tangente à origem**, também conhecido por **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, inicial**, que do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre $0,5 \text{ MPa}$ e $0,3f_c$** e ao **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a $0,3f_c$** . Este valor pode ser obtido de várias formas, optando-se neste estudo pelo método de ensaio brasileiro descrito na NBR 8522 / 1984 da ABNT, para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo I descrito no mesmo método, que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ISO 6784:82 e na Norma MERCOSUL 05:03-0124 de 1997. Convencionou-se indicar este módulo de elasticidade por E_{ci} , geralmente expressando-o em GPa.
- o **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c** . Em geral trabalha-se com o **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre $0,5 \text{ MPa}$ e $0,4f_c$** , que é equivalente ao **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a $0,4f_c$** , pois esta é normalmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Este valor pode ser obtido de várias formas, optando-se neste estudo pelo método de ensaio brasileiro descrito na NBR 8522 / 1984 da ABNT, para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo II descrito no mesmo método, que por sua vez é

equivalente ao método de ensaio descrito na ASTM C 469. Convencionase indicar este módulo de elasticidade por E_c , geralmente expressando-o em GPa.

- o **módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica**. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado. Além destes é possível definir outros módulos, tais como módulo dinâmico, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto, etc., em geral todos de pouca utilidade prática.

Há vários modelos de previsão do módulo de elasticidade, sendo mais utilizados aqueles que correlacionam o módulo de elasticidade com a resistência à compressão do concreto. Segundo os diferentes códigos e normas, os modelos podem ser dos tipos indicados de 2.1 a 2.6.

2.1 Texto da NB 1 da ABNT de 1978

- item 8.2.5:

$$E_{ci} = 6600 \cdot f_c^{0,5} \quad \text{em MPa}$$

$$\text{para } f_c = f_{ck} + 3,5 \text{ MPa}$$

2.2 Texto proposto para a NB 1 da ABNT de 1997

$$E_c = 4700 \cdot f_{ck}^{0,5} \quad \text{em MPa}$$

$$\text{sendo } E_c = 0,9 \cdot E_{ci}$$

2.3 Texto do ACI 318 de 1995

- item 8.5:

$$E_c = 4733 \cdot f_{ck}^{0,5} \quad \text{em MPa}$$

sendo definido neste caso que se trata do módulo secante a $0,45f_c$.

2.4 Texto do CEB / FIP Model Code 90, de 1993

- item 2.1.4.2:

$$E_{ci} = E \cdot 21500 \cdot [(f_{ck}+8)/10]^{1/3}$$

onde E depende da natureza do agregado, a saber

natureza	E
basalto e diabásio	1,2
granito e gnaisse	1,0
calcário	0,9
arenito	0,7

2.5 Modelo em paralelo (Voigt)¹

$$E_{ci} = E_{ci1} \cdot c_1 + E_{ci2} \cdot c_2 \quad \text{em MPa}$$

onde c_1 e c_2 são as frações volumétricas da pasta e dos agregados, respectivamente, no volume total de concreto.

2.6 Modelo em série (Reuss)²

$$E_{ci} = E_{ci1} \cdot E_{ci2} / (E_{ci2} \cdot c_1 + E_{ci1} \cdot c_2) \quad \text{em MPa}$$

onde c_1 e c_2 são as frações volumétricas da pasta e dos agregados, respectivamente, no volume total de concreto.

Para utilização dos modelos 2.5 e 2.6 são necessários os módulos das pastas e dos agregados. Apesar de muito variáveis, como ordem de grandeza podem ser adotados como módulos de elasticidade típicos da pasta e das rochas, os valores indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Módulos típicos de elasticidade de pastas e rochas.

material	módulo de elasticidade, em GPa
gabro ³	130
basalto ³ e diabásio ³	65
quartzito ³	55
granito e gnaisse ³	35
arenito ³	12
pasta a/c = 0,25 ⁴	24
pasta a/c = 0,38 ⁴	19
pasta a/c = 0.48 ⁴	16

¹ MEHTA, P. Kumar & MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Trad. Paulo Helene et alli. São Paulo, PINI, 1994. p. 476

² MEHTA, P. Kumar & MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Trad. Paulo Helene et alli. São Paulo, PINI, 1994. p. 479

³ FURNAS, Laboratório de Concreto. **Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo; Ensaios e Propriedades**. Editor Walton Pacelli de Andrade. São Paulo, PINI, 1997. p. 6.21

⁴ valores obtidos experimentalmente no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Engenharia de Construção Civil do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, CPqD do PCC da EP da USP. Ensaios em corpos de prova cilíndricos de diâmetro 5 cm e altura 10 cm, conforme adaptação do método da NBR 8522 para carregamento tipo I, aos 28 dias de idade.

3. METODOLOGIA

3.1 Programação do experimento

- Variáveis independentes:
 - consistência do concreto fresco → (50 ± 5) mm ; (100 ± 10) mm ; (200 ± 25) mm
 - traço em massa seca → 1:3 ; 1:4 ; 1:5 ; 1:6 ; 1:7
 - idades de 3d, 7d, 28d, 63d, 91d, 182d, 364d
 - uma areia quartzosa de rio, lavada
 - uma brita 1 de granito
 - um cimento CP II E 32
 - sem aditivos
- Variáveis intervenientes:
 - massa específica do concreto fresco
 - consumo de cimento por m^3 de concreto
 - consumo de água por m^3 de concreto
 - teor de ar aprisionado
 - teor de argamassa seca em massa
 - volume de pasta por m^3 de concreto, c_1
 - volume de agregados por m^3 de concreto, c_2
- Variáveis dependentes:
 - resistência à compressão, f_c
 - módulo de elasticidade inicial, E_{ci}
 - módulo de elasticidade secante a 0,4 de f_c , E_c

3.2 Materiais

Foi utilizado cimento Portland composto, tipo CP II E 32 que atende a EB 2138 da ABNT (NBR 11.578), doado pela Votoran, com massa específica de $3.090 \text{ kg} / m^3$.

Foi utilizada areia lavada de rio, quartzosa, que atende a NBR 7211, zona 3, média.

Foi utilizada brita granítica, tipo n. 1, que atende a NBR 7211, proveniente da Pedreira Cantareira.

Foi utilizada água potável proveniente do abastecimento da Sabesp.

3.3 Resultados

Os resultados obtidos para os traços de consistência seca, medida pelo abatimento do tronco de cone, estão apresentados na Tabela 3.3.1.

O volume de pasta fresca, c_1 em %, é obtido pela soma do volume de cimento anidro, mais o volume de água, mais o volume de ar, por m^3 de concreto adensado.

O volume de agregados, c_2 em %, é obtido por diferença entre 100 menos o volume de pasta, c_1 .

Tabela 3.3.1 Resultados para os traços de consistência seca.

descrição	traço 1:3	traço 1:4	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:7
abatimento, em mm	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5	50 ± 5
relação a/c, em kg/kg	0.338	0.423	0.514	0.617	0.700
teor argamassa seca, em %	55	55	55	55	55
massa específica, em kg/m ³	2382	2391	2377	2322	2321
consumo cimento, em kg/m ³	548	440	364	303	266
consumo de água, em kg/m ³	185	186	187	187	187
teor de ar, em % de volume	1.2	1.8	1.7	2.3	2.8
volume de pasta, c_1 em %	0.366	0.340	0.316	0.304	0.297
volume de agregado, c_2 em %	0.634	0.660	0.684	0.696	0.703
f_c , 3d, em MPa	46.2	27.1	18.1	15.0	6.9
f_c , 7d, em MPa	53.7	36.3	22.1	18.8	10.8
f_c , 28d, em MPa	62.1	48.0	36.1	26.0	17.0
f_c , 63d, em MPa	64.0	52.1	40.0	27.8	17.5
f_c , 91d, em MPa	67.0	54.5	41.9	28.8	18.6
f_c , 182d, em MPa	67.8	56.5	45.0	29.7	19.5
f_c , 364d, em MPa	68.4	58.3	46.5	30.9	20.4
E_{ci} , 3d, em GPa	40.4	31.6	30.7	27.4	21.8
E_{ci} , 7d, em GPa	42.5	37.3	30.6	30.9	24.9
E_{ci} , 28d, em GPa	40.5	39.0	34.8	30.6	23.0
E_{ci} , 63d, em GPa	42.7	39.6	35.4	34.7	27.7
E_{ci} , 91d, em GPa	45.7	42.1	38.5	33.8	33.1
E_{ci} , 182d, em GPa	45.9	43.2	39.3	34.8	30.3

E_{ci} , 364d, em GPa	46.1	43.7	41.0	34.8	31.6
E_c , 3d, em GPa	35.6	30.6	28.7	25.6	20.4
E_c , 7d, em GPa	39.7	34.9	28.5	28.9	22.2
E_c , 28d, em GPa	39.9	36.1	32.2	27.9	21.7
E_c , 63d, em GPa	41.2	37.1	34.2	30.2	21.6
E_c , 91d, em GPa	43.8	38.2	34.9	31.1	29.9
E_c , 182d, em GPa	43.0	40.4	38.4	32.6	28.4
E_c , 364d, em GPa	43.1	40.8	38.4	33.1	29.8

Os resultados obtidos para os traços de consistência plástica, medida pelo abatimento do tronco de cone, estão apresentados na Tabela 3.3.2.

Tabela 3.3.2 Resultados para os traços de consistência plástica.

descrição	traço 1:3	traço 1:4	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:7
abatimento, em mm	100 ± 10	100 ± 10	100 ± 10	100 ± 10	100 ± 10
relação a/c, em kg/kg	0.382	0.475	0.574	0.677	0.791
teor argamassa seca, em %	55	55	55	55	55
massa específica, em kg/m ³	2360	2353	2341	2295	2279
consumo cimento, em kg/m ³	539	431	357	299	259
consumo de água, em kg/m ³	206	205	205	202	205
teor de ar, em % de volume	1.5	1.7	2.1	1.8	2.5
volume de pasta, c_1 em %	0.387	0.355	0.336	0.312	0.310
volume de agregado, c_2 em %	0.613	0.645	0.664	0.688	0.690
f_c , 3d, em MPa	34.8	20.2	12.9	8.8	6.1
f_c , 7d, em MPa	40.9	30.8	20.9	12.3	9.5
f_c , 28d, em MPa	51.4	41.1	33.4	18.8	14.4
f_c , 63d, em MPa	55.3	46.0	38.0	22.7	16.1

f_c , 91d, em MPa	61.1	50.1	41.4	24.6	17.5
f_c , 182d, em MPa	62.9	52.7	43.9	26.9	18.4
f_c , 364d, em MPa	65.6	55.3	46.3	28.8	20.3
E_{ci} , 3d, em GPa	33.7	29.1	24.2	21.3	18.8
E_{ci} , 7d, em GPa	34.5	32.3	28.4	23.8	21.8
E_{ci} , 28d, em GPa	31.3	35.6	32.3	20.5	22.4
E_{ci} , 63d, em GPa	35.2	37.0	36.6	30.3	26.0
E_{ci} , 91d, em GPa	37.6	38.0	34.3	32.0	26.8
E_{ci} , 182d, em GPa	39.7	38.7	36.4	30.9	29.2
E_{ci} , 364d, em GPa	41.0	37.3	37.0	31.6	28.5
E_c , 3d, em GPa	31.5	26.3	20.6	19.9	15.6
E_c , 7d, em GPa	33.3	30.3	29.0	22.3	19.0
E_c , 28d, em GPa	31.9	33.3	26.6	22.3	19.4
E_c , 63d, em GPa	35.7	34.6	31.9	27.7	24.5
E_c , 91d, em GPa	36.2	33.0	32.8	28.1	25.1
E_c , 182d, em GPa	38.4	36.2	34.1	28.9	25.0
E_c , 364d, em GPa	38.9	36.8	34.2	28.6	25.9

Os resultados obtidos para os traços de consistência fluída, medida pelo abatimento do tronco de cone, estão apresentados na Tabela 3.3.3.

Tabela 3.3.3 Resultados para os traços de consistência fluída.

descrição	traço 1:3	traço 1:4	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:7
abatimento, em mm	200 ± 25	200 ± 25	200 ± 25	200 ± 25	200 ± 25
relação a/c, em kg/kg	0.400	0.506	0.606	0.717	0.824
teor argamassa seca, em %	55	55	55	55	55
massa específica, em kg/m ³	2363	2338	2339	2314	2305
consumo cimento, em kg/m ³	538	425	355	300	262
consumo de água, em kg/m ³	215	215	215	215	216
teor de ar, em % de	1,2	1.1	1.2	1.3	1.3

volume					
volume de pasta, c_1 em %	0.393	0.357	0.336	0.320	0.310
volume de agregado, c_2 em %	0.607	0.643	0.664	0.680	0.690
f_c , 3d, em MPa	30.9	20.4	13.1	8.8	5.5
f_c , 7d, em MPa	36.3	29.9	19.6	11.7	8.4
f_c , 28d, em MPa	46.5	37.2	27.7	18.0	13.8
f_c , 63d, em MPa	50.9	40.0	33.5	20.4	15.2
f_c , 91d, em MPa	53.0	42.5	34.0	20.9	17.2
f_c , 182d, em MPa	55.7	44.6	34.1	22.1	18.6
f_c , 364d, em MPa	57.7	46.2	36.8	23.1	20.0
E_{ci} , 3d, em GPa	26.6	26.1	20.1	19.7	14.7
E_{ci} , 7d, em GPa	31.6	29.6	25.7	21.6	19.4
E_{ci} , 28d, em GPa	34.3	32.6	26.0	23.8	22.8
E_{ci} , 63d, em GPa	35.9	28.1	30.5	26.2	23.7
E_{ci} , 91d, em GPa	35.3	33.3	30.9	26.1	24.6
E_{ci} , 182d, em GPa	36.9	33.8	30.9	25.9	25.2
E_{ci} , 364d, em GPa	36.4	34.2	28.9	25.8	25.2
E_c , 3d, em GPa	25.6	24.8	18.9	17.8	16.0
E_c , 7d, em GPa	30.1	28.2	24.5	20.6	18.4
E_c , 28d, em GPa	32.7	28.4	23.6	22.6	21.8
E_c , 63d, em GPa	33.7	31.1	29.0	25.0	22.5
E_c , 91d, em GPa	33.2	31.7	27.4	24.8	23.4
E_c , 182d, em GPa	33.2	32.2	29.5	25.5	23.5
E_c , 364d, em GPa	35.1	32.0	30.2	25.9	23.3

4. ANÁLISE e DISCUSSÃO dos RESULTADOS

4.1 Estudo de dosagem

Com os resultados obtidos e apresentados no capítulo anterior foram construídos os diagramas⁵ típicos de dosagem dos concretos visando avaliar a consistência desses resultados obtidos.

Uma vez que a tecnologia dos concretos⁶ é explicada por famílias de concretos de mesma consistência quando frescos, ou de mesma relação água/cimento, foram construídos os diagramas de dosagem de cada família, conforme apresentados nas Figs. 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3.

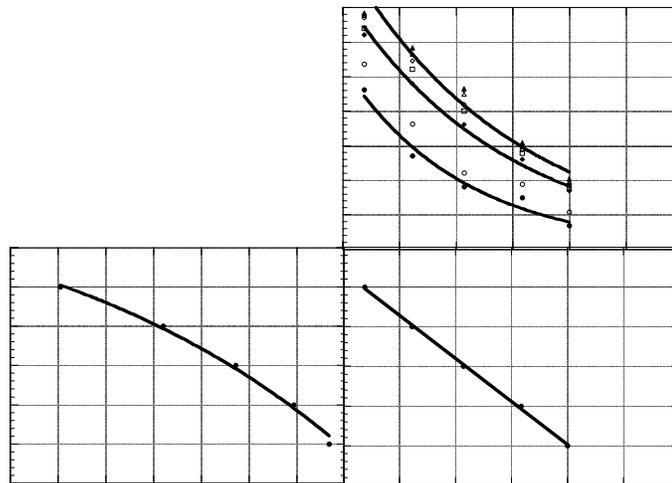


Figura 4.1.1 Diagrama de dosagem para a família de concretos de consistência seca, ou seja, neste caso de abatimento do tronco de cone de 50 ± 5 mm.

⁵ HELENE, Paulo R.L. & MONTEIRO, Paulo J.M. Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. Lausanne, **Materials and Structures**, v. 26, n. 162, Oct. 1993. p. 443-52

⁶ HELENE, Paulo R.L. & TERZIAN, Paulo R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, PINI / SENAI, 1993.

Observa-se claramente que os resultados obtidos estão bem representados pelos modelos matemáticos clássicos de representação do comportamento dos concretos.

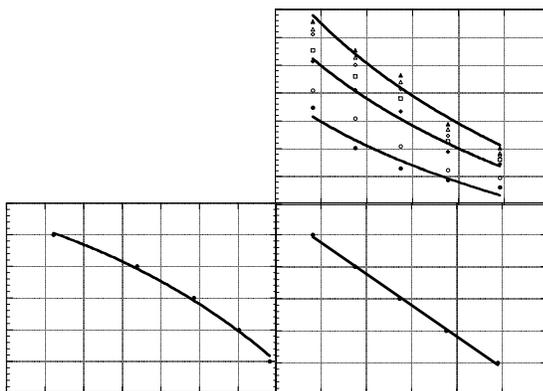


Figura 4.1.2 Diagrama de dosagem para a família de concretos de consistência plástica, ou seja, neste caso de abatimento do tronco de cone de 100 ± 10 mm.

Neste caso também observa-se claramente que os resultados obtidos estão bem representados pelos modelos matemáticos clássicos de representação do comportamento dos concretos.

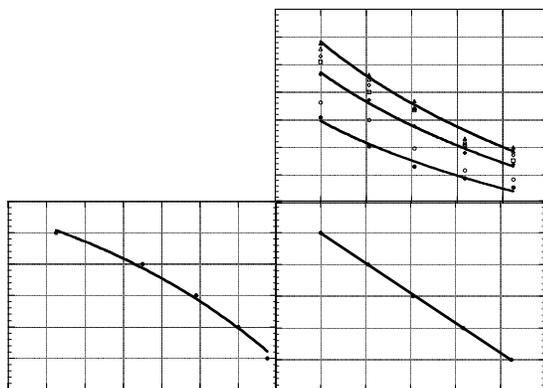


Figura 4.1.3 Diagrama de dosagem para a família de concretos de consistência fluida, ou seja, neste caso de abatimento do tronco de cone de 200 ± 25 mm.

Neste caso também observa-se claramente que os resultados obtidos estão bem representados pelos modelos matemáticos clássicos de representação do comportamento dos concretos.

A Fig. 4.1.4 apresenta os três diagramas superpostos evidenciando a coerência e características de cada família estudada.

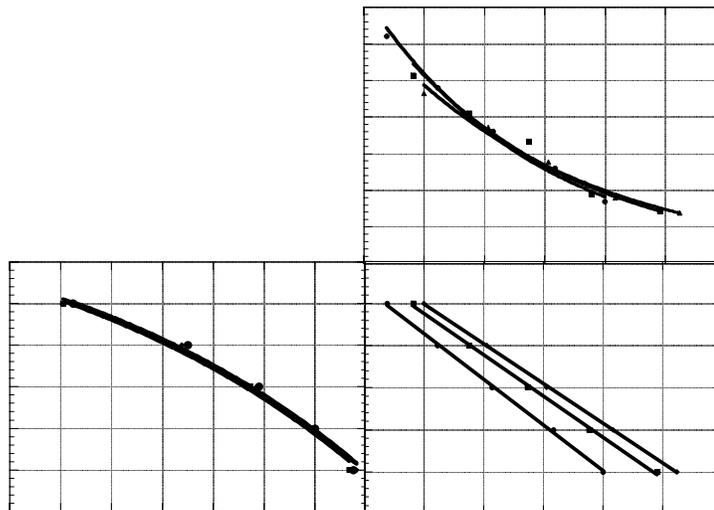


Figura 4.1.3 Diagrama de dosagem para as três famílias de concretos de consistência seca, plástica e fluida estudados. Resistências à compressão somente para a idade de 28 dias.

Conforme enunciado por Duff Abrams⁷ em 1918, no campo dos concretos plásticos, adensáveis com métodos manuais enérgicos ou mecânicos, mantidos os mesmos materiais, a resistência à compressão praticamente só depende da relação água / cimento.

Observa-se também na Fig. 4.1.3 que o aumento da fluidez do concreto conduz ao aumento do consumo de cimento por metro cúbico de concreto, mantida uma mesma resistência à compressão a uma certa idade, o que significa um aumento do volume de pasta por metro cúbico de concreto, o que vai interferir significativamente no módulo de elasticidade dos concretos.

⁷ ABRAMS, Duff Andrew. **Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Research Laboratory, 1918. (Lewis Institute Bulletin, 1)

4.2 Comparação entre módulo inicial e secante

Nas Figs. 4.2.1 apresenta-se um estudo comparativo entre os resultados experimentais obtidos e os valores recomendados por documentos consagrados no meio técnico brasileiro.

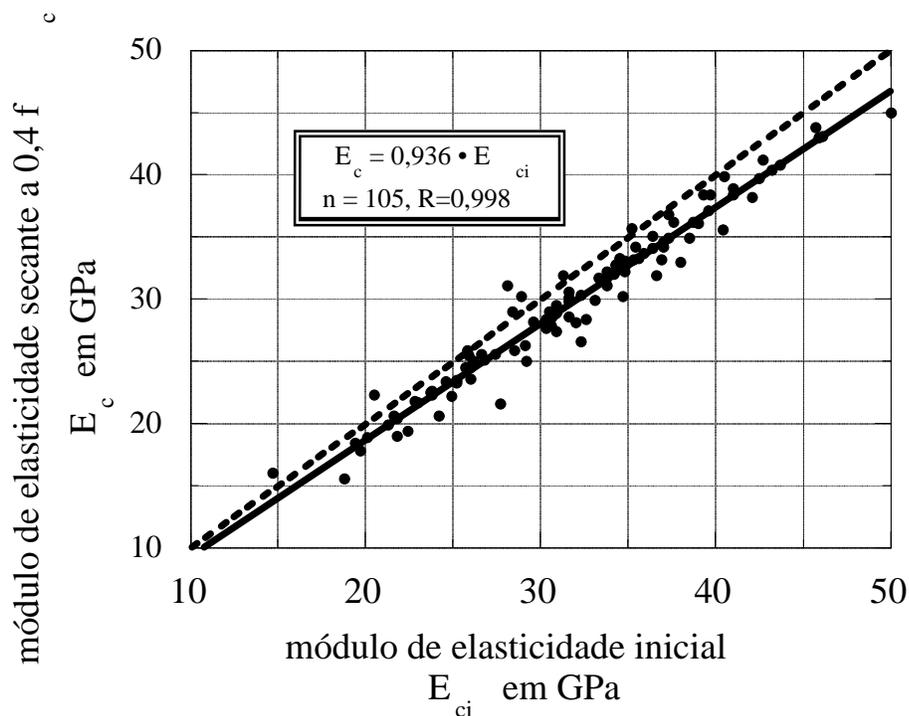


Figura 4.2.1 Correspondência entre módulo de elasticidade a $0,4f_c$, E_c , com o módulo de elasticidade inicial E_{ci} .

Os resultados obtidos neste estudo confirmam que o coeficiente de 0,9 recomendado pelo texto da nova NB 1 / 1998, representa melhor a realidade que o 0,85 muito conservador recomendado pelo FIP / CEB Model Code 90.

4.3 Correspondência entre resistência e módulo

Com os resultados obtidos para os concretos de consistência seca foi construído o gráfico da Figura 4.3.1, no qual se evidencia a pouca aderência dos modelos com base em raiz quadrada da resistência à compressão para prever o módulo de elasticidade do concreto.

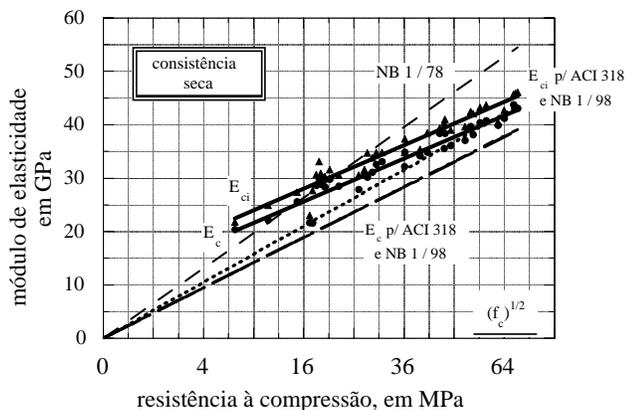


Figura 4.3.1 Correspondência entre o módulo de elasticidade e a raiz quadrada da resistência à compressão. Concreto seco.

Com os mesmos resultados do concreto de consistência seca procedeu-se à elaboração do gráfico apresentado na Figura 4.3.2, que corresponde à verificação da aderência do modelo adotado pelo CEB / FIP Model Code 90 aos resultados experimentais deste estudo.

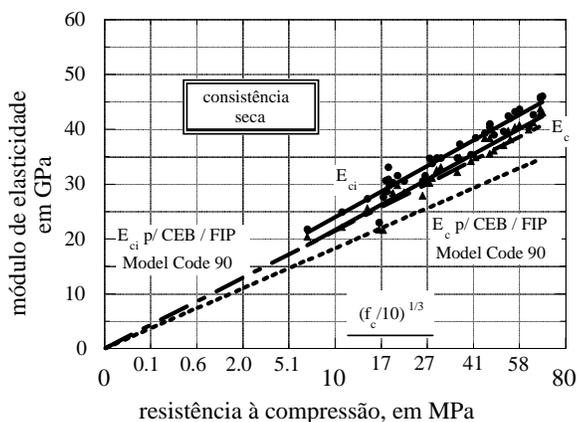


Figura 4.3.2 Correspondência entre o módulo de elasticidade e a raiz cúbica da resistência à compressão. Concreto seco.

Com os resultados obtidos dos concretos de consistência seca procedeu-se ainda à verificação dos modelos de Voigt e de Reuss, obtendo-se os valores indicados

na Tabela 2. Conforme se pode observar o modelo de Voigt supervaloriza o módulo de elasticidade do concreto no caso deste estudo.

Tabela 2. Valores comparativos entre os modelos de Voigt e de Reuss e os resultados do experimento, em GPa. Concreto seco.

traço	E_{ci} pasta <i>admitido</i>	E_{ci} agregado <i>admitido</i>	E_{ci} Voigt	E_{ci} Reuss	E_{ci} experimenta l
1 : 3	20	65	48.5	35.6	40.5
1 : 4	18	65	49.0	34.4	39.0
1 : 5	15	65	49.5	31.7	34.8
1 : 6	12	65	49.8	27.7	30.6
1 : 7	10	65	49.2	24.7	23.0

Com os resultados obtidos para os concretos de consistência plástica foi construído o gráfico da Figura 4.3.3, no qual se evidencia a pouca aderência dos modelos com base em raiz quadrada da resistência à compressão para prever o módulo de elasticidade do concreto.

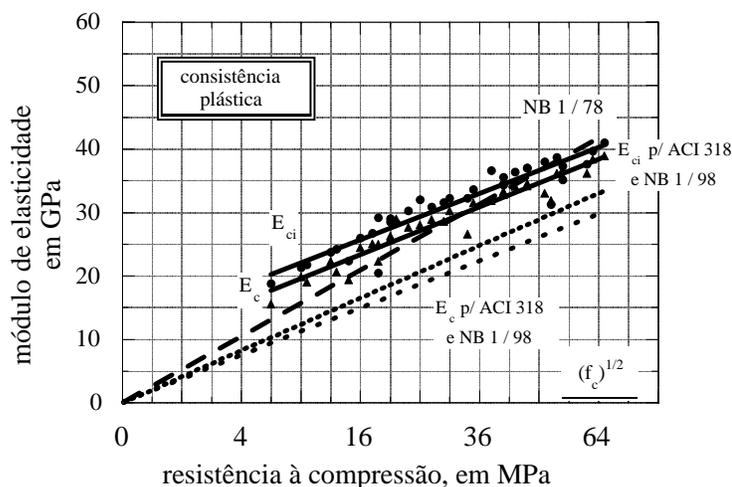


Figura 4.3.3 Correspondência entre o módulo de elasticidade e a raiz quadrada da resistência à compressão. Concreto plástico.

Com os mesmos resultados do concreto de consistência plástica procedeu-se à elaboração do gráfico apresentado na Figura 4.3.4, que corresponde à verificação da aderência do modelo adotado pelo CEB / FIP Model Code 90 aos resultados experimentais deste estudo.

na Tabela 4. Conforme se pode observar o modelo de Voigt supervaloriza o módulo de elasticidade do concreto no caso deste estudo.

Tabela 4. Valores comparativos entre os modelos de Voigt e de Reuss e os resultados do experimento, em GPa. Concreto fluido.

traço	E_{ci} pasta <i>admitido</i>	E_{ci} agregado <i>admitido</i>	E_{ci} Voigt	E_{ci} Reuss	E_{ci} experimenta l
1 : 3	20	65	47.3	34.5	34.3
1 : 4	18	65	48.2	33.6	32.6
1 : 5	15	65	48.5	30.7	26.0
1 : 6	12	65	49.0	26.9	23.8
1 : 7	10	65	48.5	24.0	22.8

4.4 Módulo de elasticidade em função da resistência à compressão

Analisando todos os resultados obtidos para o módulo de elasticidade inicial, E_{ci} , em função da resistência à compressão, f_c , para as diferentes famílias, obtem-se a configuração apresentada na Figura 4.4.1.

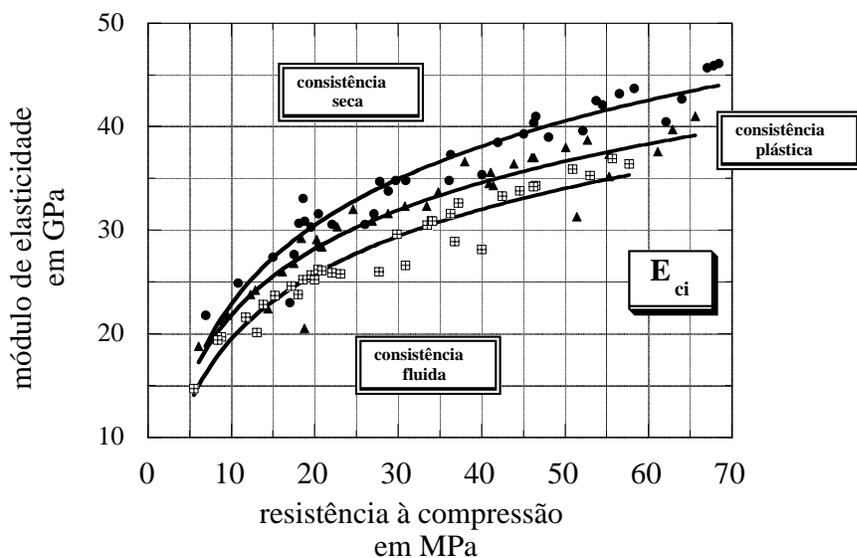


Figura 4.4.1 Correspondência entre módulo de elasticidade inicial, E_{ci} , com a resistência à compressão dos concretos de mesmos materiais porém de consistências diferentes, com idades variando de 3 d a 1 ano.

Analisando todos os resultados obtidos para o módulo de elasticidade secante a $0,4 f_c$, E_c , em função da resistência à compressão, f_c , para as diferentes famílias, obtém-se a configuração apresentada na Figura 4.4.2.

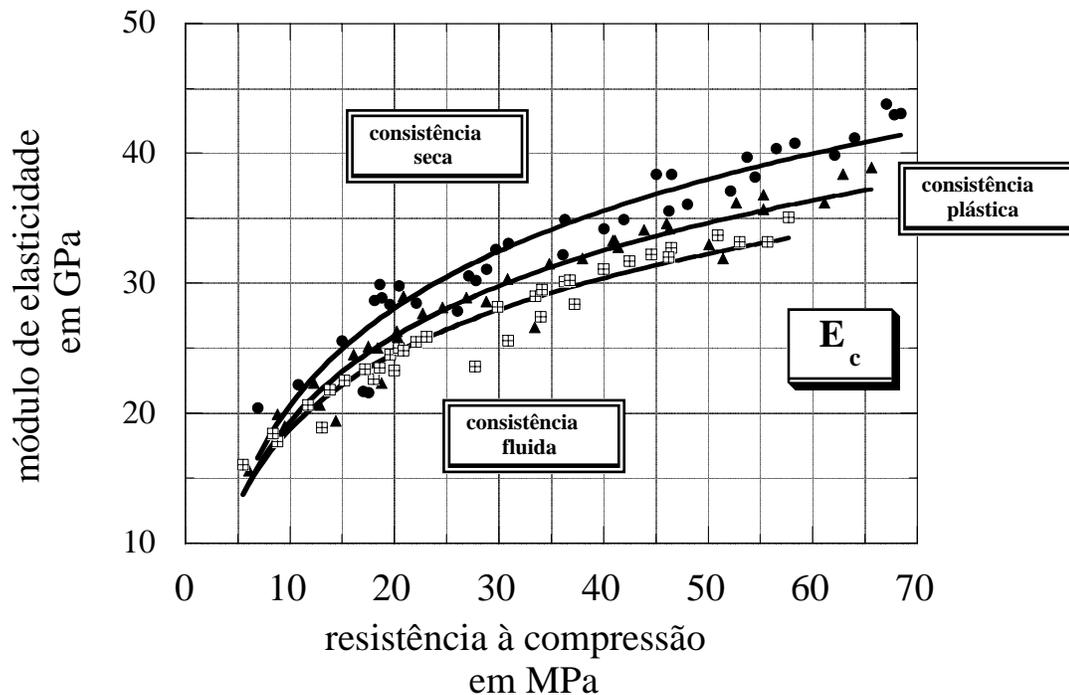


Figura 4.4.2. Correspondência entre módulo de elasticidade secante a $0,4 f_c$, E_c , com a resistência à compressão dos concretos de mesmos materiais porém de consistências diferentes, com idades variando de 3 d a 1 ano.

4.5 Comparação dos resultados com os modelos disponíveis

Na Figura 4.5.1 apresentam-se todos os resultados obtidos para E_{ci} , comparando-os com o modelo do CEB / FIP Model Code 90, que está desenvolvido para módulo inicial.

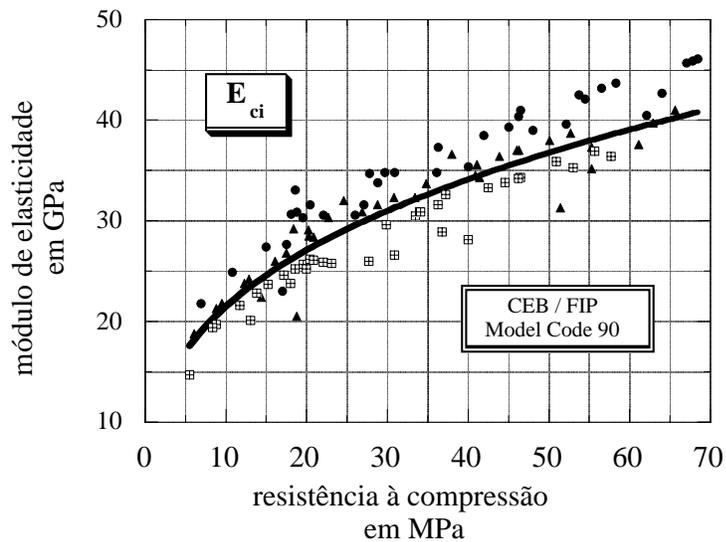


Figura 4.5.1 Comparação dos resultados experimentais com o modelo do CEB / FIP Model Code 90. Três consistências de concreto fresco, bem distintas, e idades de 3 d a 1 ano, sempre com mesmos materiais.

Na Figura 4.5.2 apresentam-se todos os resultados obtidos para E_c , ensaiados a $0,4 f_c$, comparando-os com o modelo da NBR 6118, que está desenvolvido para módulo secante a $0,4 f_c$ e com o modelo do ACI 318 / 95 que está desenvolvido para módulo secante a $0,45 f_c$.

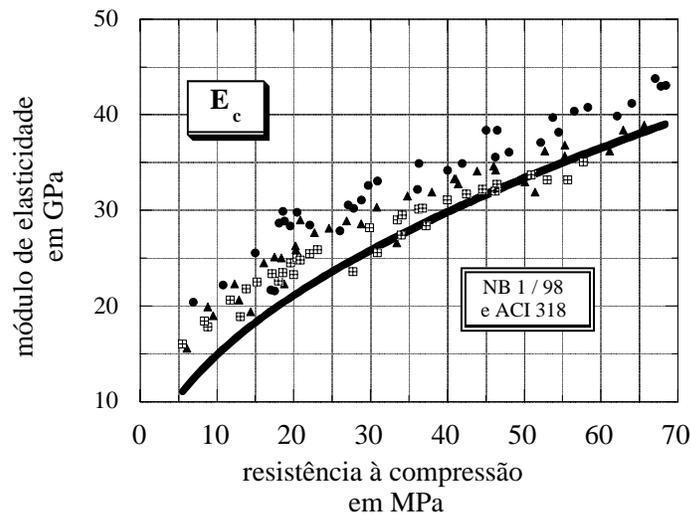


Figura 4.5.2 Comparação dos resultados experimentais com os modelos da NB1 / 98 e ACI 318. Três consistências de concreto fresco, bem distintas, e idades de 3 d a 1 ano, sempre com mesmos materiais.

5. RECOMENDAÇÕES para NORMALIZAÇÃO

Estabelecer uma faixa de variação do módulo do tipo da indicada na Tabela 4, adotando o modelo do CEB / FIP Model Code 90 que tem mais aderência aos resultados experimentais, a saber:

$$E_{ci} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot 21500 \cdot [(f_{ck} + 8) / 10]^{1/3}$$

onde α_1 e α_2 podem ser obtidos pela Tabela 4, sendo $E_c = 0,9 \cdot E_{ci}$

Tabela 4. Proposta de índices de correção do módulo básico.

natureza do agregado graúdo	α_1	consistência do concreto fresco	α_2
basalto e diabásio	1,1	fluida	0,9
granito e gnaisse	1,0	plástica	1,0
calcário, arenito e metasedimento	0,9	seca	1,1

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- 6.1 O módulo de elasticidade dos concretos é uma variável muito difícil de ser medida e muito sujeita a variabilidade nos resultados. Desta forma não é aconselhável nem conveniente julgar um concreto com base em valores individuais pois estes podem mascarar a real tendência do fenômeno. O ideal é sempre dispor de um conjunto grande de resultados representativos daquela população;
- 6.2 O módulo de elasticidade é uma variável muito sensível à dosagem ou composição do traço, mesmo quando mantidos os mesmos materiais. A resistência à compressão é só mais uma das variáveis que interferem nos resultados. A relação pasta / argamassa / agregados graúdos e a natureza dos agregados graúdos têm muita, quiçá mais, influência que a resistência;
- 6.3 Este estudo merece ter continuidade no CPqDCC ou em outros centros de pesquisa do país, para que se possa aprofundar mais no domínio desta importante questão.

São Paulo, 28 de janeiro de 1998

Eng. Paulo Helene

*Prof. Titular do Departamento de Engenharia de Construção Civil
da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PCC / USP*