

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil

ISSN 0103-9830

BT/PCC/488

**Alguns aspectos da relação entre o módulo de
deformação e a resistência à compressão do
concreto.**

Fernando Celotto Montija
Antonio Domingues de Figueiredo

São Paulo – 2008

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Boletim Técnico – Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros
Vice-Diretor: Prof. Dr. José Roberto Cardoso

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko

Conselho Editorial
Prof. Dr. Alex Abiko
Prof. Dr. Francisco Ferreira Cardoso
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves
Prof. Dr. Paulo Helene
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico
Prof. Dr. Alex Kenya Abiko

O Boletim Técnico é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia de Construção Civil, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

Este texto faz parte da dissertação de mestrado de título “Alguns aspectos da relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto”, que se encontra à disposição com os autores ou na biblioteca da Engenharia Civil.

FICHA CATALOGRÁFICA

MONTIJA, Fernando Celotto

Alguns aspectos da relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão do concreto. – São Paulo : EPUSP, 2008.

18 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/488)

1. Concretos 2. Controle tecnológico 3. Microestrutura 4. Propriedades I. FIGUEIREDO, Antonio Domingues II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Série

ISSN 0103-9830

ALGUNS ASPECTOS DA RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

SOME ASPECTS OF THE RELATION BETWEEN MODULUS OF ELASTICITY AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE

Fernando Celotto Montija¹; Antonio Domingues de Figueiredo²

¹Mestrando, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, fernandomontija@yahoo.com.br

²Professor Doutor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Resumo

Este trabalho insere-se na área de ensaios de controle de qualidade de concreto, especificamente quanto à relação entre as propriedades 'resistência à compressão' e 'módulo estático de deformação'.

Obteve-se um Diagrama de Dosagem e estudou-se um cenário de atendimento a uma especificação simultânea de resistência e módulo de deformação, sob consistências distintas, o que implicava na mudança das composições microestruturais dos traços, principalmente no que se referia ao proporcionamento entre pasta de cimento e agregados. O incremento de fluidez na consistência do concreto com conservação de atendimento dessas duas propriedades mecânicas levaria a um aumento no consumo de cimento de aproximadamente 200 kg/m³. Isso evidenciou a natureza contributiva-interativa entre a rigidez das fases dos traços de concreto.

Palavras-chave: concreto; controle tecnológico; microestrutura; propriedades (módulo de deformação; resistência à compressão).

Abstract

This work is placed in the areas of concrete control tests, specifically focusing the relation between 'compressive strength' and 'static modulus of elasticity' properties.

It was obtained a mix design diagram and it was studied a situation of fulfillment of a simultaneous specification of strength and modulus of elasticity, under different slump, which implied on the change of the micro structural compounds of the mixes, specially on the proportioning between cement paste and aggregates. The slump increase with conservation of these two mechanical properties fulfillment would require an increment in the cement consumption of approximately 200 kg per cubic meter of concrete.

This showed the contributive-interactive nature among the rigidity of the concrete phases.

Keywords: concrete; technological control; microstructure; properties (modulus of elasticity; compressive strength).

1. INTRODUÇÃO

O termo Elasticidade revela a capacidade dos materiais de retornarem à sua forma e volume originais após serem removidas as solicitações atuantes. Evidentemente, essa propriedade é dependente da composição estrutural dos materiais ao nível atômico, porque a recuperação física apenas se dá quando o material busca retornar a sua conformação de equilíbrio elétrico e de menor dissipação de energia.

Na Fig. 1.1, originalmente publicada por Callister (2002), duas curvas que indiretamente representam a energia de ligações atômicas são sobrescritas por duas retas $\left(\frac{dF}{dr}\right)_{r_0}$ que, por sua vez, indicam as respostas unidirecionais de solicitação-deformação características daquelas ligações. Uma das ligações é mais fraca (menor coeficiente angular de reta) e outra mais forte (maior coeficiente angular de reta) até os picos das curvas onde se representa a quebra das ligações e a seqüência de separação dos átomos já com menores dispêndios de energia. Se aliviadas antes dos picos, as ligações retornariam ao estágio de equilíbrio de energia inicial (Força $F = 0$).

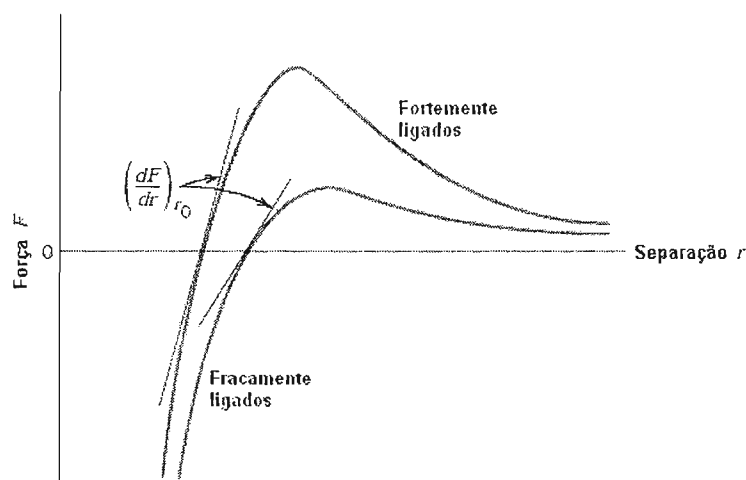


Figura 1.1 – Representação indireta da energia das ligações atômicas

Fonte: Callister (2002)

Essas retas que indicam a energia dissipada para a deformação interatômica representam também, indiretamente, as constantes elásticas dos materiais, como o módulo de elasticidade axial ou simplesmente módulo de elasticidade (E), o módulo de elasticidade transversal (G) e o módulo de elasticidade volumétrico (K). Em outros termos, e no caso de solicitações uniaxiais em materiais elásticos perfeitos, pode-se dizer que $E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \approx \frac{dF}{dr}$.

Essa conceituação auxilia na compreensão do fato de a magnitude da propriedade estar vinculada ao termo 'módulo' e não a 'elasticidade', pois traz a interpretação de que quanto maior o módulo, maior a energia despendida pelo esforço solicitante para a deformação. Se o material for pensado como uma mola, maior também será a energia potencial acumulada para o retorno ao estado de equilíbrio.

Segundo Figueiredo (2004), dentre as quatro maiores classes de materiais artificiais utilizados pela engenharia, metais, polímeros, cerâmicos e compósitos, aquelas cujos materiais forem formados por microestrutura mais complexa tenderão a ter maiores módulos de elasticidade. Por microestrutura complexa entendam-se os arranjos robustos e isentos ou praticamente isentos de imperfeições — falhas de continuidade — e de planos direcionais preferenciais de rigidez, seja pela elevada reatividade, como no caso das “nuvens de elétrons” das ligações metálicas, seja pela capacidade de imbricamento cristalino interlamelar das ligações iônicas de uma parte dos materiais cerâmicos ou pela taxa de amorfização de outra. Nos materiais poliméricos, ao contrário, as ligações covalentes são altamente direcionais e como resultado, formam-se moléculas de longas cadeias de arranjo característico que exibem ângulos de ligação bem definidos configurando planos preferenciais de rigidez. Nos materiais compósitos, enfim, pode haver a combinação de algumas dessas características químicas, com a obtenção de materiais de variados níveis de rigidez. Na Fig. 1.2 mostra-se uma representação simplificada de um arranjo cristalino genérico submetido a deformação elástica perfeita sob uma solicitação de tração. Para a solicitação de compressão, a representação do fenômeno perfeito teria apenas o sentido das deformações alterado.

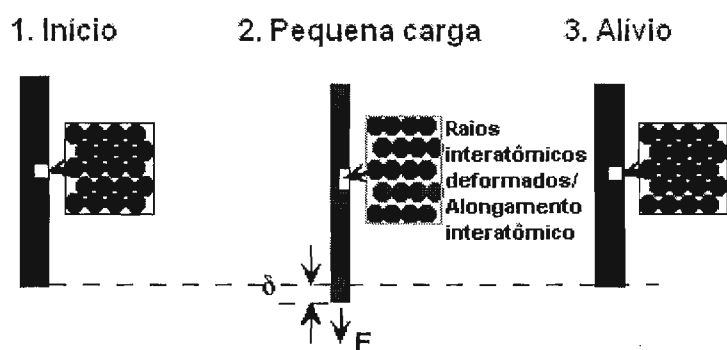


Figura 1.2 – Representação da deformação elástica perfeita em nível atômico (na tração)

Deve-se lembrar que ao se ultrapassar o nível de resistência das forças interatômicas, pode-se causar movimentações atômicas irreversíveis mesmo enquanto houver capacidade de rearranjo por novas ligações químicas e de nova conformação para o material. Reologicamente é o que se denomina de plastificação, isto é, a manifestação do fenômeno da Plasticidade. Na Fig. 1.3 tem-

se uma representação simplificada de um arranjo cristalino submetido a uma deformação combinada (elastoplástica) perfeita sob solicitação de tração. Para a compressão o fenômeno é similar, mas com aproximação interatômica.

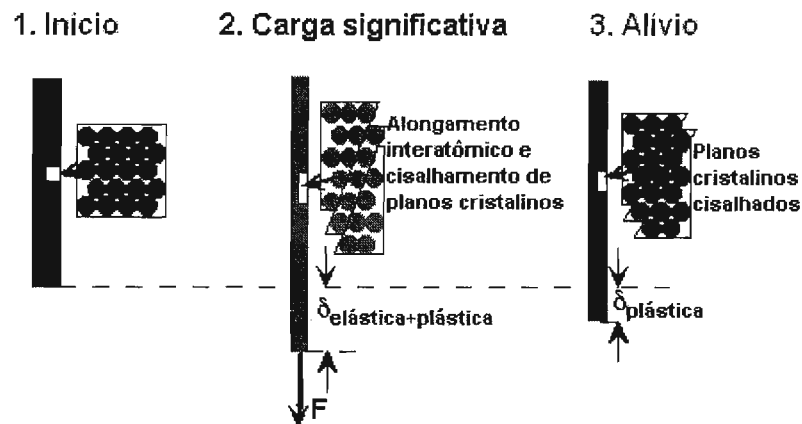


Figura 1.3 – Representação da deformação elastoplástica perfeita em nível atômico (na tração)

Note-se que o cisalhamento dos planos cristalinos causa uma deformação permanente no corpo material que não é anulada com o alívio das solicitações. No caso de não haver condições de ser assumida uma nova forma sem a interrupção completa de ligações, haverá uma fratura na microestrutura do material, e o limite de conservação da integridade deste corpo material é o que se denomina de resistência (à compressão ou à tração).

Entre os principais comportamentos reológicos dos materiais, resta ainda a chamada Viscosidade. Sua principal característica, a deformação crescente sob solicitação constante ao longo do tempo, está ligada fundamentalmente à movimentação causada pelo cisalhamento (quebra) de ligações fracas de superfície entre arranjos interatômicos — e não intra-arranjos como no caso da plasticidade. Isto a coloca como um fenômeno que pode ocorrer conjuntamente com a elasticidade e a plasticidade e que também a faz altamente dependente de fenômenos outros, externos ao corpo material, como os fatores ambientais umidade e temperatura. A deformação viscosa é também irreversível.

Ressalte-se que até o momento realizou-se a descrição de materiais perfeitos. Na realidade, o que existe na engenharia são materiais imperfeitos estruturalmente, com falhas de formação importantes para o desempenho das propriedades, além de características próprias de isotropia e homogeneidade.

O concreto de cimento Portland, por exemplo, constitui-se de uma mistura de componentes cujas ligações químicas são características dos materiais cerâmicos, mas que se comporta globalmente como um compósito. Isto porque as propriedades da pasta de cimento endurecida, incluindo a zona de transição, apresentam magnitudes muito diferentes daquelas dos agregados e as respostas

do concreto colocam-se ainda em um outro nível, em geral, composto entre o nível da resposta da pasta e o nível da resposta dos agregados. A resposta diferenciada do concreto na compressão pode ser vista nas relações tensão-deformação específica individualizadas, constantes da Fig. 1.4, de Neville (1997).

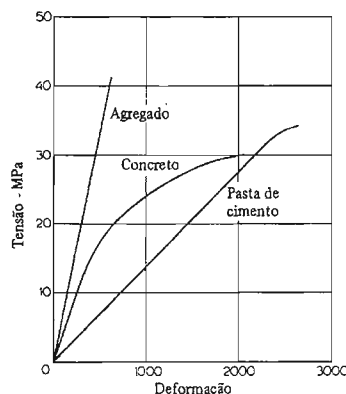


Figura 1.4 – Respostas de tensão-deformação do concreto e suas fases principais

Fontes: Neville (1997)

A resposta de deformabilidade do concreto é, então, considerada como dependente da qualidade (de rigidez) individual das fases, de sua distribuição quantitativa e da forma como estas interagem, configurando uma característica de natureza contributiva e interativa.

Note-se que a curva tensão-deformação do concreto para as solicitações usuais de compressão axial não é linear, ao contrário daquelas curvas que se referem genericamente aos agregados e à pasta endurecida.

Neville (1997) afirmou que o concreto antes mesmo de sofrer a aplicação de qualquer solicitação possuía microfissuras principalmente na zona de transição que, com a aplicação e o incremento gradual de uma solicitação, tendem a evoluir acentuadamente justificando a taxa de deformação proporcionalmente maior que a da tensão aplicada. A tensão inicial a partir da qual se desenvolveriam estas microfissuras seria dependente da relação água-cimento, isto é, da qualidade da pasta. Essas microfissuras evoluiriam inicialmente dentro da zona de transição com a aplicação da solicitação e permaneceriam estáveis até um nível em torno de 30% da resistência à compressão do concreto. Para solicitações entre 70 e 90% desta tensão última, passariam a se propagar também através da pasta.

Mehta e Monteiro (1994) também afirmaram a existência das microfissuras no momento pré-aplicação da solicitação e detalharam a evolução do sistema de fissuração do concreto através de um elemento gráfico desde então bastante divulgado (Fig. 1.5). Nele, os autores destacam um estágio inicial na relação tensão-deformação que é aproximadamente linear e que vai até 30% da tensão última de resistência desse concreto, apresentando microfissuras restritas à zona de transição. Entre 30 e 50% da tensão última, admitiu-se que as microfissuras

aumentam em número, abertura e comprimento mas que o sistema de fissuração permanece estabilizado e concentrado dentro da zona de transição. Ou seja, não haveria propagação de fissuração da zona de transição para o seio da pasta endurecida. Em tese, se daria neste nível o término da relação aproximadamente linear entre tensão e deformação. Acima dele, passaria a haver a formação e a propagação das fissuras pela pasta — principalmente na direção dos poros capilares — até a ruptura.

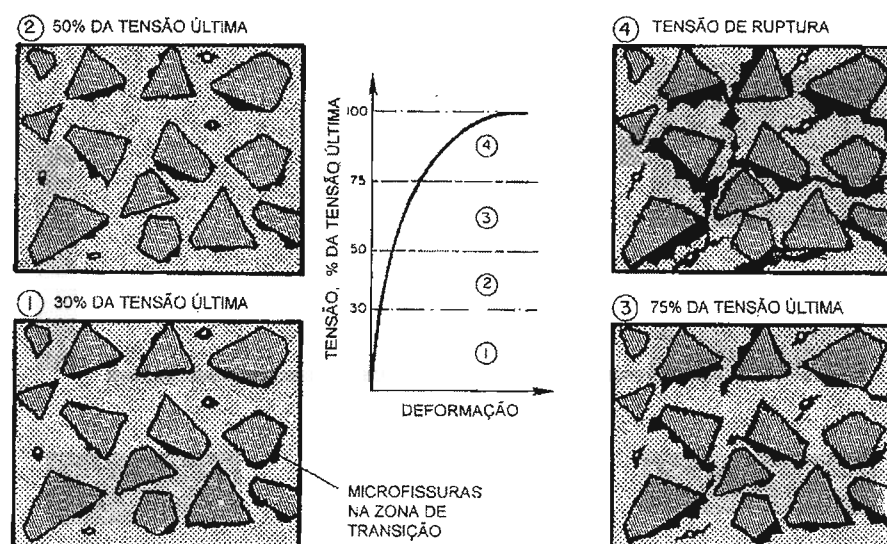


Figura 1.5 – Representação esquemática da fissuração e do comportamento tensão-deformação do concreto

Fonte: Mehta e Monteiro (1994)

A partir dessas informações é possível depreender que o nível de deformação interatômica imposto pela carga entre 30 e 50% da resistência do concreto é suficiente para que haja deformação plástica em partículas localizadas na zona de transição, principalmente, mas basicamente apenas elástica naquelas partículas localizadas no seio da pasta ou dos agregados.

Na prática experimental, a faixa de sollicitação entre 0 e 30-50% da resistência é aquela utilizada para a quantificação do módulo de elasticidade do concreto a partir do coeficiente angular de uma reta aproximada sobre a curva tensão-deformação específica obtida entre estes níveis. Aliás, este é o motivo pelo qual este trabalho prefere a designação da propriedade pelo termo 'módulo de deformação', já que para a faixa de carregamento referida as deformações não se restringem às de natureza elástica. Ressalte-se que as opções de terminologia não implicam necessariamente em incongruência técnica porque a demanda pelo estudo do módulo do concreto vem da área de projeto e construções de estruturas

de concreto armado e, a esta, o que importa é a determinação do comportamento global do material frente às aplicações que se queira dar pela Engenharia.

1.1 Projetos de estruturas: inferência do módulo de deformação a partir da resistência à compressão

Em geral, a relação resistência-módulo (σ/E) é utilizada na execução de projetos estruturais, quaisquer que sejam os materiais de Engenharia disponibilizados. Um dos Diagramas de Ashby (Fig. 1.1.1) relaciona a resistência global do material ao módulo através da relação denominada de energia elástica armazenada por unidade de volume, dada por σ/E (mínima energia), $\sigma^{3/2}/E$ (energia intermediária) ou σ^2/E (máxima energia). Quanto maior o resultado da relação resistência-módulo, maior a energia acumulada por unidade de volume durante a deformação e até a ruptura.

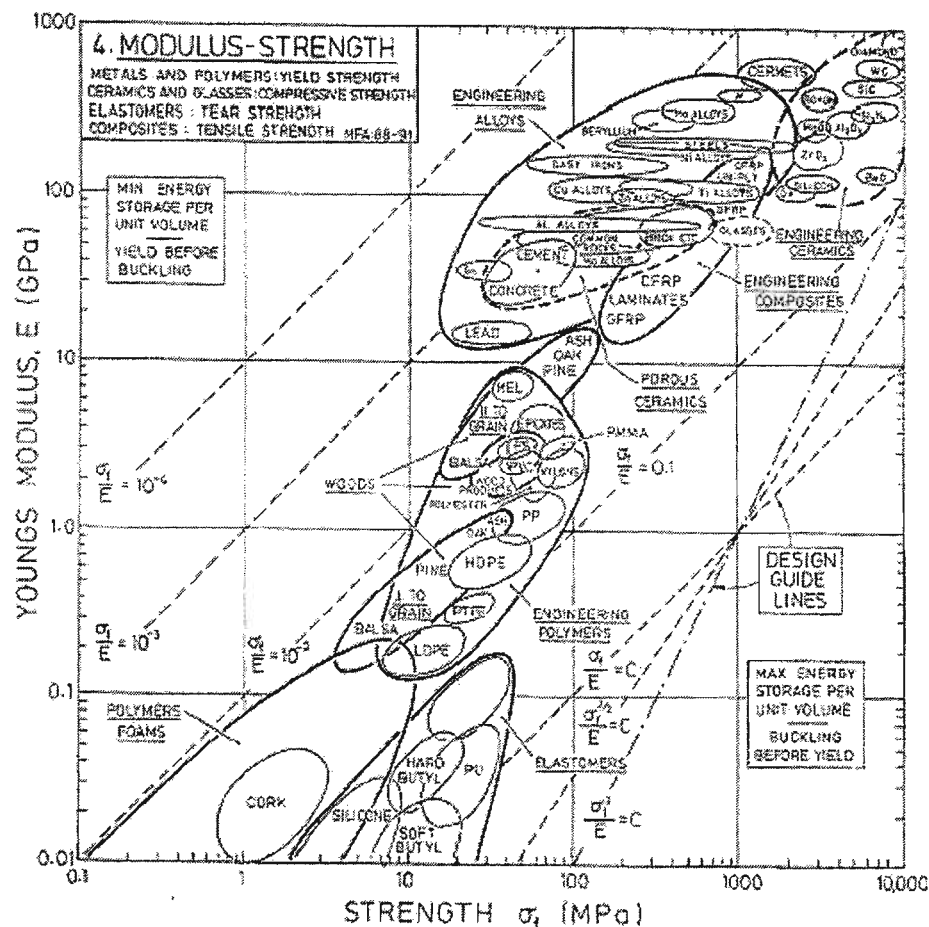


Figura 1.1.1 – Diagrama de Ashby: Módulo de Elasticidade x Resistência

Fonte: Frey (2007)

Porém, no caso do projeto de estruturas de concreto é comum relacionar o módulo de deformação à resistência à compressão de maneira inversa, isto é, como σ/E^3 ou σ/E^2 . Aparentemente, esta relação contém um significado físico único que se refere à limitação do crescimento do módulo de deformação independentemente da resistência a partir de um ponto da correlação em que o volume de pasta passa a prevalecer sobre a qualidade da pasta para os concretos usuais. Na Tab. 1.1.1 são apresentadas as relações mais comuns constantes nas normas e recomendações técnicas internacionais de projetos de estruturas de concreto.

Tabela 1.1.1 – Expressões recomendadas: Módulo de deformação do concreto x Resistência à compressão

Norma/recomendação	Expressão*
NBR 6118:2003	$E_{ci,NBR} = 5,6 \cdot f_{ck}^{1/2}$ $E_{cs,NBR} = 0,85 \cdot E_{ci}$
ACI 318M:2002	$E_{cs,ACI} = 4,70 \cdot f_{ck}^{1/2}$
CEB-FIP Model Code 1990	$E_{ci,CEB} = a \cdot [10 \cdot (f_{ck} + 8)]^{1/3}$ $0,7 \leq a \leq 1,2, \dots \dots (agregado)$

*Obs.: E_{ci} e E_{cs} significam módulo de deformação tangente inicial e módulo de deformação secante, respectivamente. Essa diferença advém de um dos procedimentos de ensaio referente ao plano de carregamento dos corpos-de-prova. Apesar dessas denominações serem universais, os procedimentos mudam nos diversos raios de ação das normas e recomendações e, por isso, optou-se ainda pelo acréscimo, nas expressões, dos índices que as identificam (NBR, ACI e CEB).

Nota-se que o volume das fases do concreto e a qualidade da rigidez dos agregados não são contemplados na maioria dessas expressões matemáticas de correlação, pois têm origem fundamentalmente empírica e, admite-se, universalizada. Por universalizada entenda-se independente de consistência do concreto, tipo ou classe de cimento e natureza mineralógica ou composição granulométrica dos agregados. Detalhadamente, no que diz respeito à qualidade da pasta ou dos agregados, pode-se dizer que todas as expressões contemplam a variável qualidade da pasta pois contém o termo ' f_{ck} ' mas apenas a expressão do CEB contempla também a qualidade dos agregados, quando considera a variável 'a' de acordo com a natureza mineralógica dos agregados recomendando, de forma resumida, o valor de 0,7 quando arenito, 0,9 quando calcário, 1,0 quando granítico ou gnáissico e 1,2 quando basáltico. Sabe-se que a variabilidade de rigidez em uma única natureza mineralógica pode ser grande e dificultar a aplicação destes coeficientes; mesmo assim, a sua aplicação está de acordo com o fenômeno físico.

Quanto aos expoentes da relação entre o módulo de deformação e a resistência à compressão, Shehata (2005) identificou que para resistências médias menores — da ordem de até 40 MPa, estima-se — atende aos requisitos

de projeto estrutural aquela do tipo σ/E^2 , como consta nas normas e recomendações de origem brasileira (NBR) e norte-americana (ACI). Já para resistências médias maiores — superiores a 40 MPa, estima-se — recomenda-se a relação σ/E^3 , como a de origem européia (CEB).

De toda forma, ressalta-se, as recomendações não devem ter caráter outro que não o uso durante o projeto estrutural, pois em comparação com as demais etapas da cadeia da construção civil — dosagem (produção) e recebimento/utilização (controle tecnológico) — esta é a única que pode desconsiderar aqueles outros parâmetros de especificação ligados aos fatores físicos que alteram a resposta de deformabilidade do concreto, como a consistência, por exemplo. Se a expectativa é de que quanto maior a fluidez do concreto, maior o volume de pasta e menor o módulo de deformação do compósito, isto pode ser praticamente independente de variação da resistência do concreto se a qualidade da pasta (relação água-cimento) tiver sido mantida. Assim sendo, tal fenômeno não pode ser desconsiderado durante a produção ou o controle tecnológico estando vinculado unicamente a uma relação do tipo σ/E , como pode ser durante o projeto estrutural.

Essa é também a discussão realizada a partir do programa experimental.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Realizou-se a amostragem de seis traços de concreto, sendo um de cada relação água-cimento escolhida (0,42, 0,50 e 0,58 kg/kg) e consistência escolhida (plástica = 100 ± 20 mm, ou fluida = 180 ± 30 mm). As opções se basearam nas expectativas de maior demanda do mercado de fornecimento de concreto dosado em central da cidade de São Paulo. De cada traço foi realizada amostragem de uma única betonada com moldagem padrão de acordo com o método nacional normalizado de 5 corpos-de-prova de dimensões 100 x 200 mm para ensaio prévio de resistência de dois corpos-de-prova e ensaio de módulo propriamente dito dos outros três corpos-de-prova. Todos os corpos-de-prova receberam a mesma cura e preparação que os da etapa anterior.

Os ensaios de determinação do módulo de deformação foram realizados sob uma instrumentação para medida das deformações denominada de *clip gages* (Fig. 2.1) e seguiram o plano de carregamento secante descritos no método normalizado e a velocidade de carregamento de 0,2 a 0,4 MPa/s.

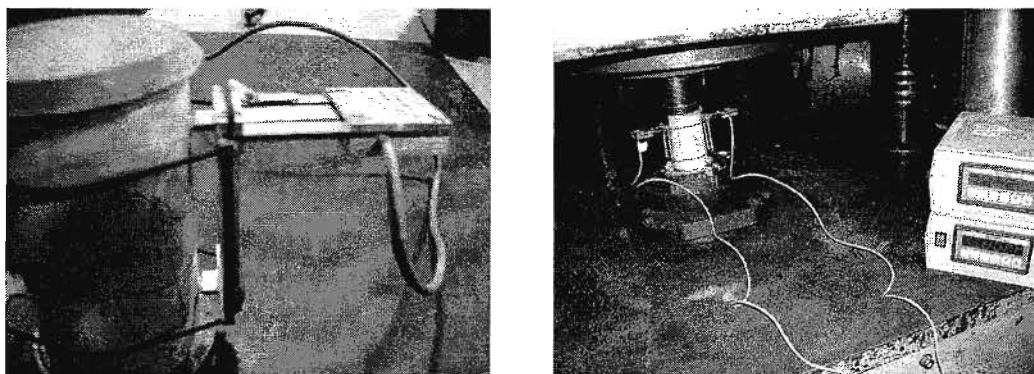


Figura 2.1 – Detalhe do sistema de medida das deformações

Os traços ensaiados constam da Tab. 2.1. Os resultados dos ensaios de caracterização dos insumos materiais utilizados constam das Tab. 2.2 e 2.3.

Tabela 2.1 - Traços e materiais utilizados no programa experimental

Traço	a/c (kg/kg)	Abatim. (mm)	Quantidade insumo por m ³ de concreto						
			Cimento	Areia	Ped.misto	Brita 0	Brita 1	Água	Aditivo
T1	0,42	100±20	462	543	293	0	902	185	2,77
T2	0,50	100±20	370	598	322	0	896	185	2,22
T3	0,58	100±20	308	634	342	0	893	185	1,85
T4	0,42	180±30	526	520	281	478	319	210	3,16
T5	0,50	180±30	420	585	315	475	317	210	2,52
T6	0,58	180±30	350	626	337	473	315	210	2,10

Materiais	Procedência
Cimento CPIII-40 RS Votoran	Fábrica Santa Helena - Votorantim/SP
Areia de brita lavada granítica	Mineração Juruáçu - São Paulo/SP
Pedrisco misto (Brita 0 e pó calcário)	Min. Araçariçuama - Araçariçuama/SP
Brita 0 granítica	Mineração Juruáçu - São Paulo/SP
Brita 1 calcária	Min. Araçariçuama - Araçariçuama/SP
Água	Rede pública de abastecimento
Aditivo plastificante Mira 95	Grace do Brasil - Sorocaba/SP

Tabela 2.2 – Caracterização laboratorial do cimento utilizado (CPIII-40 RS)

Determinação	Resultado
Água para pasta de consistência normal (%)	30,7
Início de pega (h:min)	03:25
Fim de pega (h:min)	04:35
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	26,0
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	36,1
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	49,2

Tabela 2.3 – Caracterização laboratorial dos agregados utilizados

Abertura da peneira (mm)	% Retida Acumulada			
	Areia de brita lavada granítica	Pedrisco misto (B0 e pó calcário)	Brita 0 granítica	Brita 1 calcária
19				0,6
12,5*				53,6
9,5		1,5	1,0	79,5
6,3*		14,6	23,1	95,7
4,75	0,4	26	51,4	96,5
2,36	10,4	45	89,9	96,8
1,18	32,2	61,4	97,2	97,5
0,6	52,8	70,7	98,2	97,8
0,3	71,5	81,1	98,8	97,8
0,15	93,1	91,7	99,3	98,4
Fundo	100,0	100,0	100,0	100,0
Diâmetro máximo (mm)	4,75	9,5	9,5	19
Módulo de finura	2,6	3,77	5,36	6,65
Material pulverulento (%)	2,3	12,9	0,5	1,9
Massa específica (g/cm ³)	2,65	2,72	2,66	2,74

* Obs.: Peneiras que não fazem parte da série normal.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistência e módulo de deformação dos traços do programa experimental são apresentados nas Tab. 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Resultados prévios de resistência à compressão (MPa): a/c 0,42, 0,50 e 0,58

	a/c 0,42	a/c 0,50	a/c 0,58
100 ± 20			
1	61,0	46,1	37,8
2	60,0	47,0	38,8
Média	60,45	46,53	38,35
180 ± 30			
1	57,3	46,7	42,5
2	59,7	47,1	41,0
Média	58,52	46,90	41,72

Tabela 3.2 – Resultados de módulo de deformação (GPa): a/c 0,42, 0,50 e 0,58

	a/c 0,42	a/c 0,50	a/c 0,58
100 ± 20			
1	33,3	31,3	29,2
2	33,3	31,5	29,6
3	32,8	31,0	28,3
Média	33,13	31,27	29,03

180 ± 30			
1	30,3	29,4	27,7
2	30,9	27,9	28,0
3	30,1	27,6	26,5
Média	30,43	28,30	27,40

Esse programa experimental constituiu um estudo rápido de caracterização das dosagens que permitiu a construção de um Diagrama de Dosagem as relações da resistência (f_{cm}) com a relação água-cimento (a/c) — conhecida como curva de Abrams —, da relação água-cimento com o teor de materiais secos (m) — conhecida como curva de Lyse — da relação do teor de materiais secos com o consumo de cimento do concreto (C) — conhecida como curva de Molinari ou Priszkulnik e Kirilos — e da relação entre o teor de materiais secos e o módulo de deformação (E_{cs}). Tal Diagrama de Dosagem foi construído a partir das equações de correlação dos parâmetros de dosagem vinculados aos resultados experimentais obtidos, conforme segue:

- Curva de Abrams: exponencial do tipo $f_{cj} = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$ (Tab. 3.3)

Tabela 3.3 – Regressão para Curva de Abrams

Traço	a/c (kg/kg)	fcm (MPa)	k_1	k_2
T1-042-A100 e T4-042-A180	0,42	59,5	155,3	10,4
T2-050-A100 e T5-050-A180	0,50	46,7		
T3-058-A100 e T6-058-A180	0,58	40,1		

- Curva de Lyse: reta do tipo $m = k_3 + k_4 \cdot a/c$ para cada consistência (Tab. 3.4)

Tabela 3.4 – Regressão para Curva de Lyse

Traço	Abatimento (mm)	a/c (kg/kg)	m (kg/kg)	k_3	k_4
T1-042-A100	100 ± 20	0,42	3,76	-1,92	13,66
T2-050-A100		0,50	4,91		
T3-058-A100		0,58	6,07		
T4-042-A180	180 ± 30	0,42	3,04	-1,97	12,00
T5-050-A180		0,50	4,03		
T6-058-A180		0,58	5,00		

- Curva de Molinari: hipérbole do tipo $\frac{1000}{C} = k_5 + k_6 \cdot m$ (Tab. 3.5)

Tabela 3.5 – Regressão para Curva de Molinari

Traço	m (kg/kg)	C (kg)	k_5	k_6
T1-042-A100	3,76	460	0,55	0,44
T2-050-A100	4,91	372		
T3-058-A100	6,07	310		
T4-042-A180	3,04	525		
T5-050-A180	4,03	423		
T6-058-A180	5,00	354		

- Curva do módulo de deformação: exponencial do tipo $E_{cs} = k_7 \cdot k_8^m$ para cada uma das consistências (Tab. 3.6)

Tabela 3.6 – Regressão para Curva de módulo

Traço	Abatimento (mm)	m (kg/kg)	Ecs (GPa)	k_7	k_8
T1-042-A100	100 ± 20	3,76	33,1	41,21	0,94
T2-050-A100		4,91	31,3		
T3-058-A100		6,07	29,0		
T4-042-A180	180 ± 30	3,04	30,4	35,48	0,95
T5-050-A180		4,03	28,3		
T6-058-A180		5,00	27,4		

A partir das expressões e coeficientes encontrados, pode-se gerar os resultados da Tab. 3.7 e obter o Diagrama de Dosagem mostrado na Fig. 3.1.

Tabela 3.7 – Diagrama de Dosagem

Abatim. (mm)	a/c (kg/kg)	fcj (MPa)	m (kg/kg)	C (kg)	Ecs (GPa)
100 ± 20	0,4	60,8	3,5	471	33,6
	0,5	48,1	4,9	367	31,1
	0,6	38,0	6,3	300	28,7
	0,7	30,1	7,6	254	26,6
180 ± 30	0,4	60,8	2,8	554	30,5
	0,5	48,1	4,0	428	28,7
	0,6	38,0	5,2	349	26,9
	0,7	30,1	6,4	294	25,2

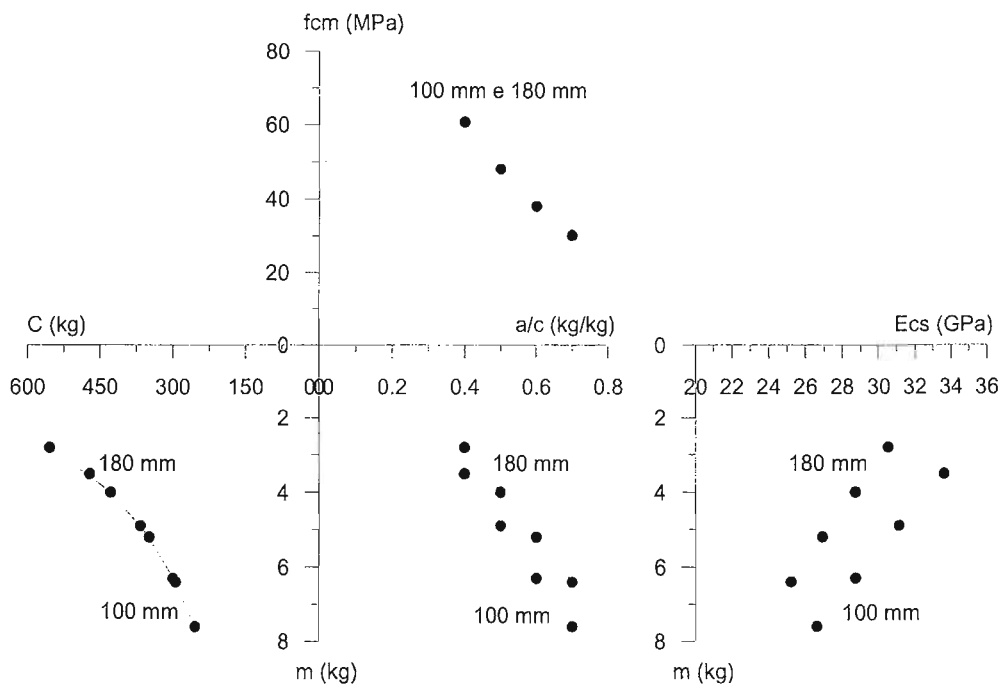


Figura 3.1 – Diagrama de Dosagem

Com o diagrama fica evidente, por exemplo, que o consumo de cimento apenas implica em maior módulo de deformação se vier acompanhado da conservação do abatimento do concreto, o que só é possível diminuindo-se a relação água-cimento. Ou seja, terá havido melhora na qualidade da pasta em termos de rigidez.

Outra evidência a partir do Diagrama de Dosagem é que a relação entre a resistência e o módulo de deformação do concreto não pode ser considerada como única já que varia de acordo com a consistência. É importante a consciência de que concretos com significativa diferença de custo decorrente de aumento do consumo de cimento pela demanda por fluidez implicará em decréscimo acentuado do módulo de deformação ainda que sem prejuízo significativo da resistência à compressão. Isso apenas ratifica que o módulo de deformação é dependente do teor de materiais secos do traço, o que, em outros termos, significa dizer ser dependente das frações volumétricas das fases constituintes do concreto.

Então, aquilo a que se denomina 'qualidade da pasta', isto é, a relação de quantidade de poros por unidade de volume da pasta, apesar de fundamental importância tanto para a resistência quanto para a rigidez, passa a pesar de maneira diferente para as duas propriedades quando se insere outro princípio, o da 'quantidade de pasta'. Se a resistência depende da propagação das fissuras, e existem regiões preferenciais para isto tanto nos concretos com maior ou com menor quantidade de pasta — região das zonas de transição pasta-agregados e regiões da pasta com poros capilares —, o módulo de deformação depende mais

do somatório das falhas ou discontinuidades de rigidez no todo. Assim, pode-se concluir que ao se produzir dois concretos com a mesma qualidade de pasta mas com quantidades de pasta diferentes — o que se consegue basicamente ao produzir dois concretos com a mesma relação água-cimento mas com consistências diferentes — ambos tenderão a ter a mesma resistência mas não o mesmo módulo de deformação, pois aquele com maior quantidade de pasta terá, no todo, maior quantidade de discontinuidades de rigidez.

Essas constatações evidenciam a variação dos resultados de módulo de deformação com a aqui chamada rigidez contributiva-iterativa das fases. Note-se que no caso deste programa experimental, não houve variação do tipo de cimento ou dos agregados, e por isso a rigidez dependeu fundamentalmente da quantidade e da qualidade da pasta de cimento endurecida e da quantidade de agregado no concreto.

Do ponto de vista prático, imagine-se a situação de atendimento a uma obra através de dosagens de traço com especificações de resistência à compressão e módulo de deformação, sob o hipotético cenário de solicitação de incremento gradual da consistência do concreto ao longo da construção dos pavimentos, mas com a conservação das especificações das propriedades mecânicas. Isto pode implicar, por exemplo, na seguinte diferença para a produção:

Ecs,m = 30 GPa, abatimento 100±20 mm	Ecs,m = 30 GPa, abatimento 180±30 mm
$E_{cs} = k_7 \cdot k_8^m = 41,21 \cdot 0,94^m = 30$	$E_{cs} = k_7 \cdot k_8^m = 35,48 \cdot 0,95^m = 30$
$\therefore m = 5,13$	$\therefore m = 2,71$
$\frac{1000}{C} = k_5 + k_6 \cdot m = 0,55 + 0,44 \cdot 5,13$	$\frac{1000}{C} = k_5 + k_6 \cdot m = 0,55 + 0,44 \cdot 2,71$
$\therefore C = 356$	$\therefore C = 574$
Diferença no consumo de cimento: 218 kg/m³	

Nota: Os resultados de módulo de deformação utilizados para simulação das dosagens foram resultados médios ($E_{cs,m}$), que correspondem aos utilizados nas expressões das curvas de correlação.

Nos dois casos, supõe-se que a resistência à compressão especificada seja atingida.

A diferença de consumo de cimento entre os fornecimentos é significativa, atingindo mais de 200 kg/m³. Esta constatação é bastante importante em termos de incremento de custos de insumos, operação e controle interno para a produção destes tipos de concreto. Inegavelmente, estas diferenças estariam em discussão no momento da contratação do fornecimento.

Reitera-se, por fim, que a especificação única da resistência à compressão com a suposição de que o módulo de deformação correlato será automaticamente atendido de acordo com as expressões preconizadas nas recomendações de projeto estrutural, pode não ser verdade. Outras vezes, mas na mesma direção, obter no ensaio de controle de qualidade da propriedade o atendimento da

correlação e identificar o não-atendimento como uma “não-conformidade” do processo de produção também não é correto, e só acrescenta ao questionamento técnico, outro de ordem comercial e até jurídica.

Acrescente-se ainda uma última constatação: todos os ensaios de módulo de deformação se deram entre a tensão básica e 30% da resistência do concreto (f_c) — tensão admitida como de limite elástico — e envolveram deformações absolutas da ordem de 30 a 50 μm em uma base de medida de 100 mm. Essa dimensão de encurtamento representa o tamanho de um grão de cimento médio-grosso. Em termos de deformação específica, o resultado corresponde a uma faixa de 0,3 a 0,5 mm/m, isto é, da ordem de 15 a 25% da deformação usualmente observada na deformação de ruptura do concreto por compressão que é de 2,0 mm/m. Assim sendo, realmente nota-se que mesmo no cenário de evolução até o nível de limite elástico de 30% da tensão última — considerado em muitos casos como um valor baixo — ainda não se configura como perfeitamente linear a relação tensão-deformação específica, pois as taxas de evolução dadas pelos percentuais do todo não são correspondentes (30% de f_c contra 15 a 25% da deformação em f_c).

4. CONCLUSÕES

Os traços de concreto selecionados (a/c 0,42, 0,50 e 0,58 kg/kg, de consistências 100 ± 20 mm e 180 ± 30 mm) permitiram a construção de um Diagrama de Dosagem que evidenciou a seguinte informação: a especificação da resistência à compressão não significa necessariamente o atendimento de um valor constante de módulo de deformação para qualquer tipo de consistência do concreto. A conservação do módulo de deformação em traços de consistências diferentes implica em incremento do consumo de cimento significativa, neste caso atingindo mais de 200 kg/m^3 . Essa diferença se deve às características microestruturais do concreto inerente a essas propriedades.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALLISTER, W.D., Jr. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- FIGUEIREDO, A.D. *Princípios de ciência dos materiais*. Notas de aula. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- FREY, D. *Materials selection in mechanical design*. Disponível em <http://web.mit.edu/2.72/www/lectures/session_8_v2.pdf>. Acesso em Janeiro, 2007.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: Pini, 1994.
- NEVILLE, A.M. *Propriedades do Concreto*. 2ª ed. São Paulo: Pini, 1997.
- SHEHATA, L.D. *Deformações instantâneas do concreto*. In: ISAIA, G.C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Ibracon, 2005. Vol.1, cap.21, p.633-654.