

JOÃO GASPAR DJANIKIAN FILHO

**CONTROLE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO NA ESTRUTURA
COM O USO DE CÉLULA DE FLUÊNCIA**

**São Paulo
2010**

JOÃO GASPAR DJANIKIAN FILHO

**CONTROLE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO NA ESTRUTURA
COM O USO DE CÉLULA DE FLUÊNCIA**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Especialista em Tecnologia e
Gestão na Produção de Edifícios
(MBA)

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Domingues de
Figueiredo

**São Paulo
2010**

FICHA CATALOGRÁFICA

Djanikian Filho, João Gaspar

Controle do módulo de elasticidade do concreto na estrutura com uso de célula de fluência. São Paulo, 2010. 78p.

Monografia (MBA em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Estrutura 2. Módulo de Elasticidade 3. Projeto Estrutural Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

DEDICATÓRIA

À minha família.

Em especial, ao meu Pai.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus que me ajudou a reunir forças e tempo para desenvolver esse trabalho.

Ao professor e orientador Antônio Figueiredo pelo apoio, amizade e contribuição durante o andamento da pesquisa.

Em especial, ao professor Odair Trindade pela generosidade, carinho e brilhantes contribuições sobre o tema.

Aos demais mestres da USP, Francisco Cardoso e Mércia Barros, pelo incentivo constante.

RESUMO

O trabalho nasceu da necessidade do projetista estrutural identificar o módulo de elasticidade no instante da desforma. Foi feita uma pesquisa junto aos calculistas e definido que o estudo deveria ser iniciado nas usinas de concreto. Nessa condição de estar no laboratório da central dosadora para definição do traço do concreto e do módulo, a célula de fluência surgiu como uma alternativa promissora.

A grande diversidade dos concretos produzidos no Brasil vem exigindo dos laboratórios um controle cada vez mais apurado. Alguns fatores intrínsecos variam de acordo com os materiais empregados (cimento e agregados) e com as próprias recentes tecnologias, como, concreto auto adensável e concreto de alto desempenho. Essa situação exige que as propriedades do concreto sejam conhecidas antecipadamente e avaliadas conforme sua utilização.

Nesse trabalho são apresentados procedimentos da NBR 6118 que tornaram mais visíveis a reformulação dos processos construtivos, criando vínculos inseparáveis com o controle tecnológico do concreto. Conhecimentos cada vez mais aprofundados sobre tipos de cimento disponíveis no mercado, e quais as suas potencialidades, estudos de dosagem, e tecnologia do concreto, trazem informações relevantes ao projetista.

Muitos problemas relacionados à deformabilidade das estruturas estão em pauta na atualidade e os construtores cada vez mais preocupados com essa questão, vêm alterando seus processos de execução, afim de, minimizar essa problemática, introduzindo além do controle de resistência a compressão, o controle para o módulo de deformação.

Foi apresentado um estudo de caso em que a célula de fluência se apresentou viável na obtenção do módulo de elasticidade de 26 GPa para uma tensão de 8 MPa, afim de liberar os serviços de protensão nas lajes aos 4 dias de idade.

ABSTRACT

The work arose from the need to identify the structural designer's modulus at the instant of structure mold releasing. We conducted a survey and determined that the study should be started in the concrete plant. In this condition of being in the central laboratory of dosing to define the trace of the concrete and the module, cell streaming has emerged as a promising alternative.

The diversity of concrete produced in laboratories today are requiring a more accurate control. Some intrinsic factors vary with the materials used (cement and aggregates) and with the very latest technologies, such as concrete, self compacting and high performance concrete. This situation requires that the properties of concrete are known in advance and evaluated according their use.

In this paper we present procedures of the NBR 6118 which made it more visible to the reformulation of the construction process, creating inseparable links with the control technology of concrete. Increasingly detailed knowledge about types of cement available in the market and what their potential, studies of dosing and mixing technology, provide relevant information to the designer.

Many problems related to the deformability of structures are on the agenda today and manufacturers are increasingly concerned with this issue, have altered its enforcement procedures, so as to minimize this problem by introducing beyond the control of resistance to compression, the control for modulus of deformation.

We presented a case study in which the cell creep appeared feasible to obtain the elastic modulus of 26 GPa for a stress of 8 MPa in order to release the services of prestressing on the structure slabs to four days of age.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1 - Foto aérea do Edifício e-Tower que possui pilares com concretos de alto desempenho e resistências à compressão entre 109 a 149 MPa aos 28 dias. Fator água cimento = 0,19.....	17
Figura 2.1.2 – Curvas de tensão – deformação para concreto de alta resistência aos 28 dias.....	17
Figura 2.2.1. Representação comportamental para materiais linearmente elásticos e não linearmente elásticos.....	19
Figura 2.2.1.1 – Diagrama tensão x deformação, que demonstra o comportamento linearmente elástico diretamente proporcional à carga aplicada.....	20
Figura 2.2.1.2 – Crescimento Linear das deformações.....	21
Figura 2.2.2.1 - Diagrama que representa o crescimento linear das deformações sob carregamento - Módulo de Young (constante elástica).....	22
Figura 3.1.1 – Deformação do concreto ao longo do tempo.....	23
Figura 3.1.2 – Diferentes tipos de módulos de elasticidade.....	24
Figura 3.2.1 – Fissuras em alvenaria por deformação vertical da viga.....	25
Figura 3.2.2 – Ecs é definido como secante da curva tensão-deformação, traçada do ponto de tensão nula até a tensão de compressão equivalente a $0,45 \cdot f_c'$	27
Figura 3.2.3 – Representação esquemática do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial.....	30
Figura 3.2.4 – Representação esquemática do módulo de deformação secante.....	30
Figura 3.2.5 – Comparativo gráfico dos diversos modelos de previsão para o módulo de deformação.....	31
Figura 3.2.6 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade.....	32
Figura 3.3.1 - Influência dos parâmetros de dosagem no módulo de elasticidade.....	33
Figura 3.3.2 – Micro-fissuração do concreto decorrente do nível de tensão aplicada	34
Figura 3.3.3 – Evolução da resistência e do módulo de elasticidade para diferentes concretos.....	35

Figura 3.3.4 – Formato dos agregados graúdos utilizados no concreto em ensaios realizados no laboratório.....	37
Figura 3.3.5 – Módulo de Elasticidade x Resistência à compressão para diferentes agregados graúdos.....	37
Figura 3.3.6 – Ensaio de histerese em concretos com idade de 28 dias 1 – Calcário; 2 – Diabásio; 3 – Granito; 4 – Seixo.....	38
Figura 3.3.7 – Diagrama tensão – deformação sob ciclos de carga e descarga a 70% da carga de ruptura do concreto com agregado granítico – Ø 25 mm e $f_c = 83,8 \text{ Mpa}$	38
Figura 3.3.8 – Módulo de elasticidade em função do conteúdo de agregado graúdo e das condições de cura.....	39
Figura 3.3.9 – Diagrama tensão – deformação para pasta de cimento, concreto e agregado.....	40
Figura 3.3.10 – Parâmetros de ensaio que interferem no módulo de elasticidade.....	40
Figura 3.3.11 – Influência da velocidade de carregamento no concreto.....	41
Figura 3.3.12 – Tipos de extensômetro utilizados no estudo de CUPERTINO; et. al. sobre fatores que interferem nos resultados de módulo.....	42
Figura 3.3.1.1 – Evolução da resistência do concreto ao longo do tempo. Comparativo entre a cura do concreto ao ar com a cura úmida por 28 dias.....	44
Figura 6.1.1 – Diagramas de tensões e de deformações em diversas idades pelo método de superposição de efeitos.....	60
Figura 6.2.1 - Detalhe genérico da célula de fluência e seus componentes.....	61
Figura 6.2.2 – Detalhe genérico dos dispositivos utilizados na medição do módulo de elasticidade na estrutura de concreto.....	62
Figura 6.2.3 – Detalhe esquemático da “ponte de wheatstone” para conversão dos valores e determinação das deformações no “strain gage”. R1 – Célula de fluência. R2 – Compensador.....	62
Figura 6.3.1 – Instalação e concretagem da célula de fluência no laboratório da usina de concreto para conhecimento do comportamento do material.....	63
Figura 6.3.2 – Equipamento utilizado na obtenção do módulo de elasticidade no laboratório da usina.....	64

Figura 7.1.1 – Instalação e concretagem da célula de fluência e do compensador na estrutura da obra em local determinado pelo projetista estrutural.....	66
Figura 7.1.2 – Obtenção do módulo de elasticidade do concreto por meio da célula de fluência instalada na estrutura.....	67
Figura 7.1.3 – Deformação obtida no concreto com aplicação da pressão de ar na célula de fluência no instante da desforma	67
Figura 7.1.4 – Vista interna do pavimento da obra sem os escoramentos.....	68
Figura 9.1 – Roseta instalada na partícula crítica (a) e posterior concretagem do dispositivo (b).....	70
Figura 9.2 – Detalhe genérico da partícula crítica sob o estado triplo de tensões.....	71
Figura 9.3 – Histograma de efeitos dinâmicos nos sensores da roseta na retirada das fôrmas.....	71
Figura 9.4 – Foto do deflectômetro mecânico instalado para leitura da flecha no ponto de maior deslocamento.....	72
Figura 9.5 – Registro da flecha no instante da desforma.....	72
Figura 9.6 – Exemplo de modelos físicos reduzidos em acrílico para panos de laje em edifícios.....	73
Figura 9.7 - Ensaio de carregamento para análise do comportamento estrutural no modelo físico reduzido em laboratório.....	73
Figura 9.8 – Sensor roseta de três direções para análise do modelo reduzido.....	74
Figura 9.9 – Sensor instalado em uma viga de acrílico para verificação dos esforços de cisalhamento próximos ao apoio.....	74
Figura 9.10 – Diagrama das tensões a partir do modelo analítico criado por elementos finitos.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1 – Dosagens calculadas experimentalmente de acordo com o procedimento de MEHTA e AITCIN, em Kg/m ³	18
Tabela 3.2.1 – Efeito do tipo de agregado no módulo de elasticidade.....	28
Tabela 3.2.2 – Módulos de elasticidade para concretos de densidade normal com agregados quartizíticos.....	28
Tabela 3.3.2 – Resistência e Módulo de elasticidade de algumas rochas.....	35
Tabela 3.3.3 – Valores de módulo de elasticidade do concreto em função do tipo de agregado utilizado.....	36
Tabela 3.3.4 – Módulo de elasticidade para diversos tipos de agregados.....	36
Tabela 3.3.5 – Análise estatística dos resultados de ensaio realizados.....	43
Tabela 3.4.1 - Resultados obtidos para os traços de consistência seca.....	47
Tabela 3.4.2 - Resultados obtidos para os traços de consistência plástica.....	48
Tabela 3.4.3 - Resultados obtidos para os traços de consistência fluida.....	49
Tabela 6.3.1 – Resultados obtidos do material desenvolvido no laboratório da usina.....	64
Tabela 6.3.2 – Estudo de concreto com variação de resistência de 30 a 60 Mpa aos 28 dias.....	65
Tabela 7.1.1 – Resultados obtidos na célula de fluência da estrutura interpolados pelo método das superposições de efeitos “Bureau of Reclamation”	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo.....	14
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Metodologia.....	14
2. GENERALIDADES.....	16
2.1 As recentes mudanças no concreto.....	16
2.2 O conceito da elasticidade dos materiais.....	19
2.2.1 Robert Hooke (1660) - Teoria de elasticidade.....	20
2.2.2 Thomaz Young (1802) - Crescimento linear das deformações sob carregamento.....	21
3. O MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO AO LONGO DO TEMPO.....	22
3.1 Tipos e determinação do módulo de elasticidade do concreto.	22
3.2 A evolução e as diversas alterações no emprego do módulo de elasticidade no decorrer do tempo.....	24
3.3 Principais fatores que contribuem para o aumento das deformações.....	33
3.3.1 Quais os cuidados necessários.....	43
3.4 Variações de resultado na obtenção do módulo de elasticidade do concreto.....	46
4. O MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA O PROJETISTA ESTRUTURAL... 51	
4.1 Freqüentes dúvidas dos projetistas estruturais com relação ao módulo de elasticidade.....	51
4.1.1 Convivendo com as incertezas ou criando soluções?.....	51

4.2	A necessidade e a evolução dos parâmetros de controle para as estruturas de concreto armado.....	52
4.3	O controle tecnológico do concreto como parte do escopo do Projeto de Estrutura.....	53
5.	A RESPOSTA DAS CONCRETEIRAS AO PEDIDO DO PROJETISTA.	56
5.1	Como é controlado o módulo de elasticidade nas condições de produção.....	56
5.2	É possível dosar o concreto para atender aos requisitos do módulo de elasticidade?.....	57
5.3	Existe concreto específico sendo produzido apenas para atender o requisito do módulo?.....	58
6.	ALTERNATIVA PARA MEDIDA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA ESTRUTURA.....	59
6.1	Princípio teórico.....	59
6.2	A célula de fluência.....	61
6.3	A medida do módulo de elasticidade no laboratório.....	63
7.	ESTUDO DE CASO – OBRA HOTEL IBIS CONGONHAS.....	66
7.1	A medida do módulo de elasticidade na estrutura.....	66
8.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
9.	ESTUDOS FUTUROS.....	70
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

A grande diversidade dos concretos produzidos na atualidade vem exigindo dos laboratórios, um controle cada vez mais apurado. Alguns fatores intrínsecos variam de acordo com os materiais empregados (cimento e agregados) e com as próprias recentes tecnologias, como, concreto auto adensável e concreto de alto desempenho. Essa situação exige que as propriedades do concreto sejam conhecidas antecipadamente e avaliadas conforme sua utilização.

O objetivo deste trabalho é introduzir um mecanismo prático e eficiente para instrumentação de obras com estruturas de concreto armado que, por meio de uma célula de fluência instalada nas peças estruturais, se obterá o valor para o módulo de deformação, no instante da desforma, parâmetro exigido pela NBR-12655.

O propósito em se atender os parâmetros estabelecidos pelo projetista estrutural, regidos pela norma NBR-8522: 2003 da ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, receberá uma dimensão diferente e realista, pois sua verificação se dará diretamente na estrutura e em tempo real.

1.2 Justificativa

Com o sistema de medição e controle adotado para o módulo de elasticidade diretamente na estrutura de concreto, haverá um ganho significativo na eficiência dos processos de controle da estrutura, pois o comportamento que envolve os corpos-de-prova, desde sua fabricação, manuseio, transporte, cura, e rompimento não estarão influenciando nos resultados. As condições de lançamento e cura são bem distintas.

1.3 Metodologia

O trabalho nasceu da necessidade do projetista estrutural identificar o módulo de elasticidade no instante da desforma. Foi feita uma pesquisa junto aos calculistas e definido que o trabalho deveria ser iniciado nas usinas de concreto. Nessa condição de estar no laboratório da central dosadora para definição do traço do concreto e do módulo, a célula de fluência surgiu como uma alternativa promissora.

Uma vez definido o traço de concreto para um determinado projeto, através do seu f_{ck} e do módulo de elasticidade, é feita uma instrumentação desse concreto no âmbito do laboratório da usina.

Instrumentação no laboratório

Os materiais utilizados nesse ensaio deverão ser os mesmos utilizados na futura estrutura da obra, não podendo sofrer variações. Caso haja escassez de matéria prima ou falta de algum dos componentes testados previamente, novos ensaios deverão ser realizados.

Essa instrumentação é feita por uma célula de fluência, composta de uma câmara, um diafragma para pressão, um sensor elétrico “*strain gage*” imerso no concreto e um dispositivo compensador.

No instante da medida do módulo, um computador estará conectado à célula de fluência, registrando os deslocamentos e deformações imediatas do concreto.

Essa medida feita em várias idades diferentes permite-nos traçar a curva de caracterização do módulo de deformação do concreto ao longo do tempo.

Instrumentação na Estrutura (obra)

Levantada a curva de caracterização do módulo de deformação do concreto como material, o passo seguinte é repetir esta medida nas condições da obra.

Para tanto, a célula de fluência é geralmente instalada em um pilar a ser concretado, a qual sofre as mesmas condições de temperatura e cura do concreto da estrutura.

No mesmo dia da concretagem, que normalmente coincide com o primeiro andar tipo do edifício, é instalada uma roseta, ou seja, um conjunto de três sensores em três direções diferentes, localizada na partícula crítica de tensão, definida pelo modelo analítico do projetista estrutural. Sua finalidade é medir as tensões do concreto da estrutura em três direções, enquanto a célula de fluência permite determinar o módulo de elasticidade do material concreto.

Outro ponto crítico de medida é o da flecha na partícula de maior deflexão, no instante da retirada total dos escoramentos, por meio de um deflectômetro mecânico.

A localização destas partículas críticas, dependendo dos casos, poderá ser determinada através de modelos físicos reduzidos, com simulação de cargas permanentes e acidentais adotadas nas premissas do cálculo estrutural.

Estes três parâmetros medidos na obra, o módulo de deformação do concreto, as tensões na partícula crítica e a flecha no maior ponto de deflexão, tem sido um suporte importante para o projetista estrutural, na adoção de f_{ck} 's mais elevados, em consonância com a estrutura mais esbelta, porém menos deformável.

2. GENERALIDADES

2.1 As recentes mudanças no concreto

A bibliografia indica que a primeira utilização do concreto armado foi em 1850 por Jean-Louis Lambot. Com tão pouca idade, muitas transformações foram introduzidas. As características dos materiais envolvidos mudaram, juntamente com as técnicas de execução.

Questões que relacionam durabilidade, dosagem, uso de adições pozolânicas, escória de alto forno, fibras, polímeros, são temas atuais e em constante desenvolvimento aplicados às novas construções, ou mesmo, em caráter de manutenção para as antigas. Concretos com resistência à compressão da ordem de 50 MPa ou superior abrem espaços para análise sobre durabilidade, segurança e o próprio custo das estruturas.

As características de resistência e durabilidade superiores desses concretos são pontos atualmente pré-estabelecidos na fase de projeto e implicarão diretamente nos processos executivos e de produção que, por sua vez, requererão maior controle, racionalização e compatibilização. Além disso, os concretos de alta resistência podem oferecer alternativas econômicas para muitos casos. Em edifícios altos, acima de 30 pavimentos o uso desse tipo de concreto possibilita a redução nominal da seção dos pilares para os dois terços inferiores da estrutura, enquanto que no terço superior o concreto convencional se enquadraria perfeitamente.

Segundo MEHTA (2008), a capacidade de carga de edifícios de vários andares com o uso de concretos de alto desempenho aumentaria 4,7 vezes para um aumento de 3 vezes no custo.

A figura 2.1.1 ilustra um edifício de multi-pavimentos em concreto armado onde ganhos de eficiência com o uso do concreto de alto-desempenho foram incorporados ao projeto.



Figura 2.1.1 – Foto aérea do Edifício e-Tower que possui pilares com concretos de alto desempenho e resistências à compressão entre 109 a 149 MPa aos 28 dias. Fator água cimento = 0,19

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

Segundo MEHTA (2008), para se atingir resistências à compressão até 70 MPa, são necessários agregados graúdos de boa qualidade e de dimensões máximas de 20 a 25 mm. Para produzir resistências superiores a 100 Mpa, agregados de dimensão máxima de 14 a 20 mm devem ser usados. A figura 2.1.2 apresenta curvas de tensão – deformação para concretos com diferentes tipos de agregados.

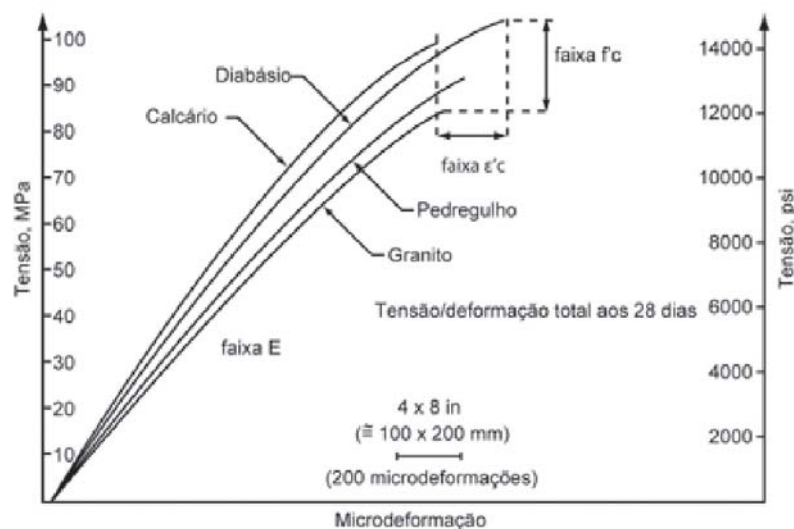


Figura 2.1.2 – Curvas de tensão – deformação para concreto de alta resistência aos 28 dias.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

O pesquisador complementa que dependendo das propriedades desejadas, os concretos de alto desempenho, podem conter um ou mais tipos de aditivos químicos, tais como, plastificantes redutores de água, controladores de pega e incorporadores de ar. As altas resistências alcançadas, com agregados de baixa dimensão exigem, por sua vez, altos teores de materiais cimentícios. Comumente, esses consumos ultrapassam a casa dos 400 Kg/m³. MEHTA (2008) salienta que teores cimentícios de 600 Kg/m³ e até mais altos têm sido analisados, porém, sem tanta utilização pelo fato de elevar em demasiado o custo do concreto. Fatores relacionados à retração por secagem e retração térmica também limitam sua utilização para esses consumos. A fim de se manter a retração por secagem e a fluência em níveis baixos, a relação do volume da pasta cimento-agregado é fixada em 35/65. Para se obter ganhos consideráveis de resistência, o consumo de cimento deverá ser parcialmente substituído por adições minerais e a parte da água substituída por aditivos superplastificantes.

A tabela 2.1.1 demonstra vários métodos de dosagem de concreto de alta resistência discutidos pelo comitê do ACI.

Grau de Resistência	Resistência Média (Mpa)	Opção	Materiais Cimentícios			Água Total	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo	Total	Relação a/c
			Cimento Portland	Cinza Volante	Silica Ativa					
A	65	1	534	-	-	160	1050	690	2434	0,30
		2	400	106	-	160	1050	690	2406	0,32
		3	400	64	36	160	1050	690	2400	0,32
B	75	1	565	-	-	150	1070	670	2455	0,27
		2	423	113	-	150	1070	670	2426	0,28
		3	423	68	38	150	1070	670	2419	0,28
C	90	1	597	-	-	140	1090	650	2477	0,23
		2	447	119	-	140	1090	650	2446	0,25
		3	447	71	40	140	1090	650	2438	0,25
D	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	471	125	-	130	1110	630	2466	0,22
		3	471	75	42	130	1110	630	2466	0,22
E	120	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		2	495	131	-	120	1120	620	2486	0,19
		3	495	79	44	120	1120	620	2478	0,19

As dosagens acima são para concretos sem ar incorporado, embora se admitam 2% de ar incorporado. A água total inclui a água contida no aditivo superplastificante, cuja dosagem pode variar de 3 a 10 l/m³, dependendo dos requisitos de consistência e de resistência, teor de material cimentício e tipo de superplastificante.

Tabela 2.1.1 – Dosagens calculadas experimentalmente de acordo com o procedimento de MEHTA e AITCIN, em Kg/m³.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

Segundo HERVÉ NETO (2005), a manutenção dos consumos elevados de cimento tornou os concretos mais resistentes, com maior compacidade, menor deformabilidade e, portanto, mais duráveis para as estruturas de concreto.

Com os concretos mais resistentes, mesmo com seu custo maior por metro cúbico, novas possibilidades e alternativas de projeto puderam ser criadas. Peças mais esbeltas, com menor área de fôrmas, vãos cada vez maiores, redução na taxa de armadura, tornaram o sistema construtivo de estruturas amplamente mais econômico.

Surge, nesse momento, a necessidade de se medir o módulo de elasticidade do concreto dentro do seu contexto estrutural.

2.2 O conceito da elasticidade dos materiais

Alguns materiais elásticos quando submetidos a carregamentos apresentam uma relação linear entre a tensão e a deformação e por isso são chamados de linearmente elásticos. Os materiais que não acompanham esse princípio são denominados não - linearmente elásticos. O ponto onde a tensão induz uma deformação permanente é chamado de limite elástico. A figura 2.2.1 apresenta os diferentes comportamentos para os materiais.

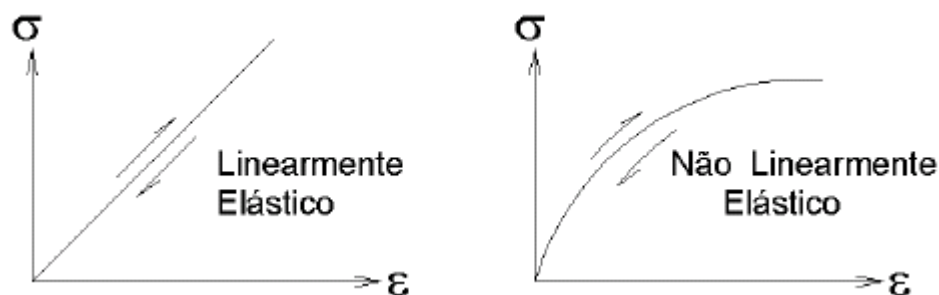


Figura 2.2.1. Representação comportamental para materiais linearmente elásticos e não linearmente elásticos.

Quando as tensões aplicadas em um corpo de prova de concreto durante uma prova de carga são suprimidas, a deformação por ele sofrida desaparecerá parcialmente. A propriedade do material, que faz com que ele retorne ao formato inicial é denominada elasticidade.

O concreto é um material não dúctil, não homogêneo, portanto sua capacidade de deformação é baixa. A parcela de deformação por ele sofrida durante o ensaio que não desaparecer, define-se como deformação permanente.

2.2.1 Robert Hooke (1660) – Teoria de elasticidade

A teoria da elasticidade desenvolvida pelo matemático inglês Robert Hooke (1635-1703), é baseada na proporcionalidade entre a força aplicada sobre um determinado material e sua respectiva deformação.

Esse conceito é chamado Lei de Hooke, e pode ser expresso pela equação:

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

onde:

σ representa um determinado esforço aplicado sobre o objeto,

E é uma constante de proporcionalidade, conhecida como módulo de elasticidade. É o coeficiente angular da parte linear do diagrama tensão x deformação e

ε a deformação causada no objeto.

A figura 2.2.1.1 apresenta o diagrama tensão x deformação para obtenção do valor do módulo de elasticidade (E).

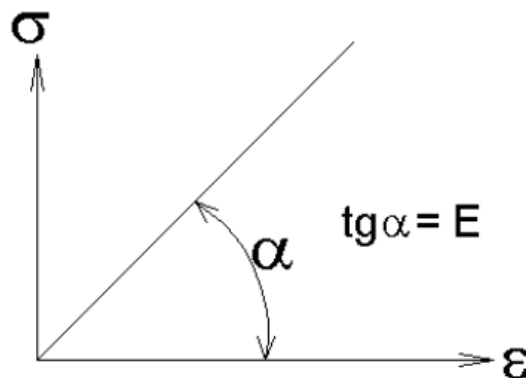


Figura 2.2.1.1 – Diagrama tensão x deformação, que demonstra o comportamento linearmente elástico diretamente proporcional à carga aplicada.

A figura 2.2.1.2 demonstra o crescimento linear das deformações sob um carregamento que num determinado instante é suprimido. Cessada essa solicitação a deformação desaparece por completo, caracterizando esse material como elástico.

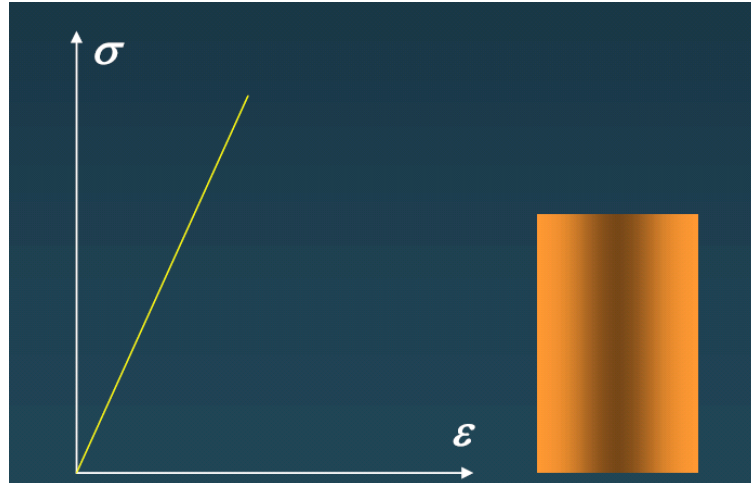


Figura 2.2.1.2 – Crescimento Linear das deformações

Fonte: BATTAGIN (2007)

A Lei de Hooke no concreto, segundo BATTAGIN (2007), se aplica para valores limitados a tensões de até 30% da carga de ruptura (f_c).

2.2.2 Thomaz Young (1802) - Crescimento linear das deformações sob carregamento

Em 1802 Thomas Young, médico e físico inglês, avançou na teoria de Hooke, chegando à noção do módulo de elasticidade. Sua expressão era um tanto quanto confusa e de difícil entendimento entre as pessoas da época.

“O módulo de elasticidade de uma substância é uma coluna, seu comprimento (l) feita dessa mesma substância, capaz de produzir uma pressão (p) em sua base, que está para o peso (σ) causador de um certo encurtamento por compressão (Δl), como o comprimento (l) da substância está para a diminuição (Δl) desse comprimento.”

O comprimento a que se referia, seria o volume da seção transversal de área unitária.

Para intervalos onde a deformação é elástica há uma relação entre a tensão e a deformação. A divisão entre essas grandezas é denominada constante elástica ou “Módulo de Young”.

A figura 2.2.2.1 representa a constante elástica a partir das deformações aplicadas.

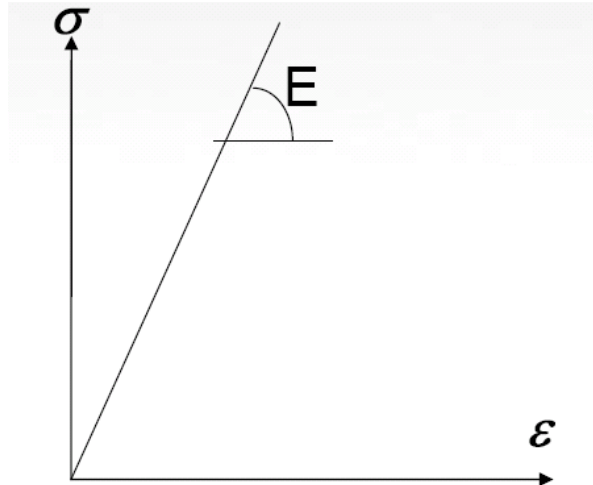


Figura 2.2.2.1 - Diagrama que representa o crescimento linear das deformações sob carregamento - Módulo de Young (constante elástica)

Analisando a teoria Young, subentende-se que a tensão aplicada à coluna seria capaz de duplicá-la de tamanho para o caso de forças de tração ou reduzir seu comprimento a zero para esforços de compressão.

3. O MÓDULO DE ELASTICIDADE AO LONGO DO TEMPO

3.1 Tipos e determinação do módulo de elasticidade do concreto

As deformações no concreto podem ser agrupadas de duas maneiras diferentes:

- Deformações imediatas são aquelas que ocorrem nas primeiras idades e logo após os primeiros carregamentos. Na maioria dos casos são consideradas elásticas.
- Deformação lenta é o fenômeno que caracteriza o aumento da deformação ao longo do tempo por intermédio das cargas de utilização.

A figura 3.1.1 indica o comportamento do concreto a partir das deformações por ele sofridas ao longo do tempo.

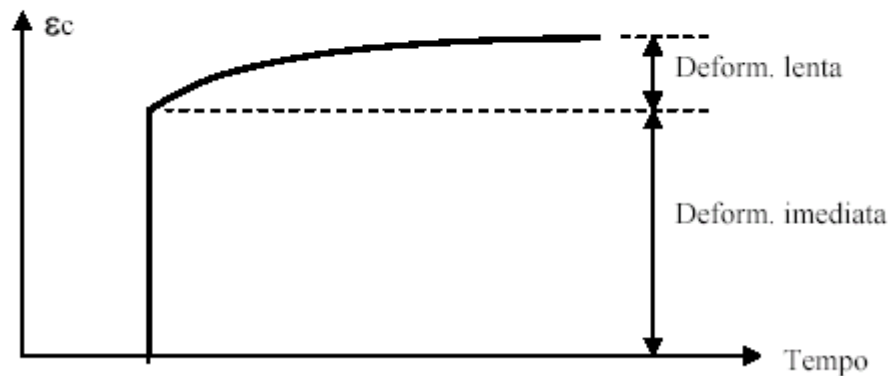


Figura 3.1.1 – Deformação do concreto ao longo do tempo

Fonte: CAMACHO (2006)

Para se medir as deformações imediatas, a ABNT NBR 12.655 recomenda aos projetistas estruturais que especifiquem o valor do módulo de deformação do concreto para o instante da desforma como sendo o primeiro momento em que a estrutura estaria recebendo carregamento.

Como o módulo de elasticidade do concreto é calculado por meio de uma curva não-linear de tensão – deformação, três métodos são utilizados para essa finalidade.

1. Módulo de Elasticidade Tangente é caracterizado pela reta tangente à qualquer ponto da curva do diagrama tensão – deformação. (E_{ci})
2. Módulo de Elasticidade Secante é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão – deformação que parte da origem, para uma determinada tensão considerada no ensaio. (E_{cs})
3. Módulo de Elasticidade Cordal, comparado ao módulo secante, ao invés da reta partir da origem, ela se inicia em um ponto com afastamento de 50 micro-deformações e 0,5 Mpa de tensão aplicada, a fim de se corrigir uma leve concavidade que surge no início da curva. (E_{cordal})

A figura 3.1.2 ilustra os diferentes tipos de módulo de elasticidade obtidos a partir da curva tensão x deformação.

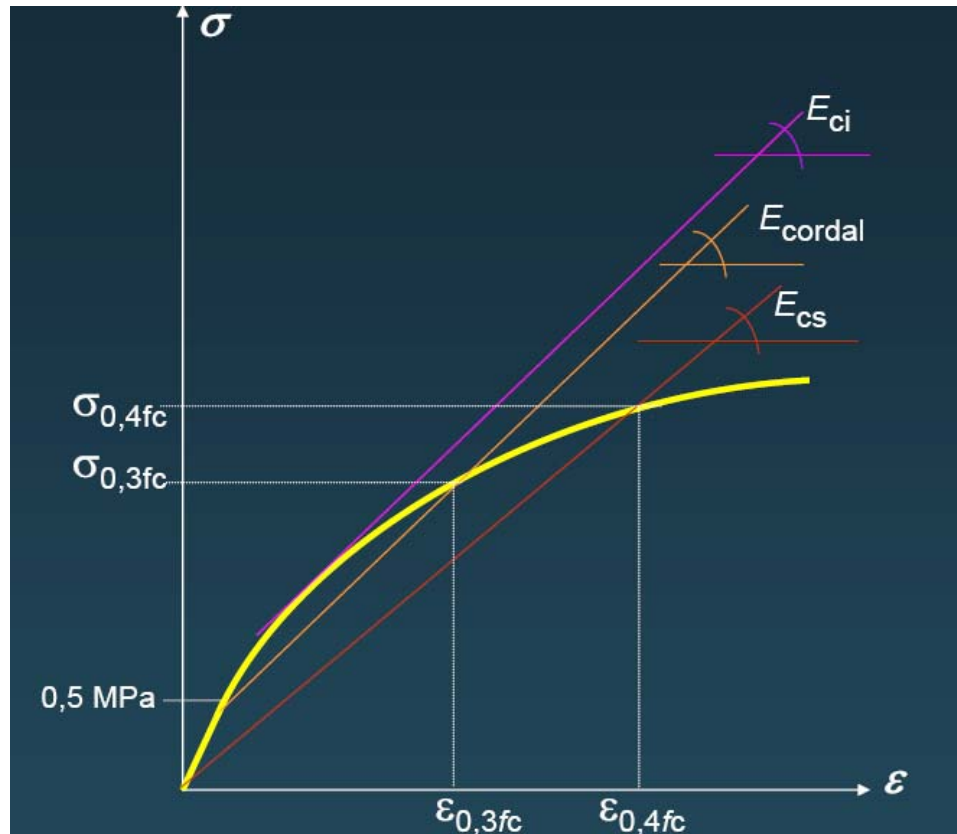


Figura 3.1.2 – Diferentes tipos de módulos de elasticidade

Fonte: BATTAGIN (2007)

O módulo de deformação dinâmico, por ser muito pequeno, é dado aproximadamente pelo módulo de deformação tangente inicial, que parte da origem. É utilizado em estruturas que são submetidas a terremotos ou que sofreram algum tipo de impacto e pode ser medido por meio de ensaio ultra-sônico.

3.2 A evolução e as diversas alterações no emprego do módulo de elasticidade no decorrer do tempo

A necessidade e o interesse pela obtenção de valores para o módulo de elasticidade surgiram como contraponto à ocorrência de fissuras em alvenaria de vedação, em estruturas de concreto com pouca idade.

A figura 3.2.1 mostra o comportamento final da deformação de uma viga de concreto armado, em um edifício de multi-pavimentos, entregue na cidade de São Paulo no final da década de 90, sendo repassado diretamente para as alvenarias de vedação.

Essas alvenarias, como o próprio nome diz, funcionam como elementos de vedação, não sendo projetadas para receber esse tipo de carregamento. Portanto, quando submetidas às tensões verticais provenientes da estrutura, rompem causando fissuração horizontal nos blocos. Esse tipo de ruptura, na maioria dos casos, é acompanhado de estrondos, e deslocamento dos revestimentos.



Figura 3.2.1 – Fissuras em alvenaria por deformação vertical da viga

Fonte: DJANIKIAN, TRINDADE (2001)

Estudos apontaram como a principal causa dessa patologia a deformação lenta do concreto, após a elaboração das novas Normas de cimento. Essa constatação estaria levando o problema para a área do principal componente do concreto, o cimento. Entretanto, o que se verificava, eram concretos com menores consumos de cimento, com os mesmos *fcks* de 20 anos atrás, que decorriam em menores módulos de deformação. DJANIKIAN, J.G; TRINDADE O.A, (2001).

A Norma Brasileira NBR 12.655:1992 inovou pedindo que os projetistas estruturais especificassem o valor do módulo de elasticidade no momento da desforma. A realidade mostrou que na década de 70, apenas com a especificação da resistência a compressão, o módulo automaticamente era atingido.

Segundo DJANIKIAN, J.G; TRINDADE O.A (2001), estudos realizados em concretos de resistência 18 MPa, na época do lançamento da norma, confirmaram os valores baixos para o módulo de deformação da ordem de 21 a 25 MPa, normalmente utilizados na região da Grande São Paulo.

A Norma Brasileira - NBR 6118:1978 indicava o cálculo do módulo de elasticidade do concreto a partir da expressão:

$$E = 6.600 \sqrt{f_{cj}}$$

onde:

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

E: Módulo de elasticidade do concreto

f_{cj} : Resistência característica à compressão do concreto na data desejada

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias

Nessa época os concretos possuíam consumos elevados de cimento em sua composição (300 Kg/m^3) e os valores para o módulo passíveis de ser atingidos.

Segundo VASCONCELLOS (1998), durante a revisão da NBR 6118, que estava em aprovação na época, decidiu-se reduzir consideravelmente seu valor, tomando como base ensaios feitos na COPPE, no Rio de Janeiro e a Norma Americana ACI 318-95.

A nova fórmula sugerida, para obtenção dos valores de módulo reduzia o coeficiente de 6.600 para 4.700 (29%). Os 4.250 encontrados nos ensaios da COPPE seriam aplicáveis somente aos agregados do Rio de Janeiro.

$$E_c = 4.700 \sqrt{f_{ck}}$$

onde:

E_c : Módulo de elasticidade do concreto

f_{ck} : Resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias

A norma americana ACI 318-95 é a única que proporciona valores para o módulo de elasticidade em função da densidade do concreto. A expressão utilizada para o cálculo é a seguinte:

$$E_c = w_c^{3/2} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f_c'}$$

onde:

E_c : Módulo de elasticidade estático (Mpa)

w_c : Densidade do concreto (Kg/m^3)

f_c' : Resistência a compressão aos 28 dias (Mpa)

A figura 3.2.2 apresenta o ponto de 45% da carga de ruptura para obtenção do valor do módulo de elasticidade estático, segundo a ACI 318-95.

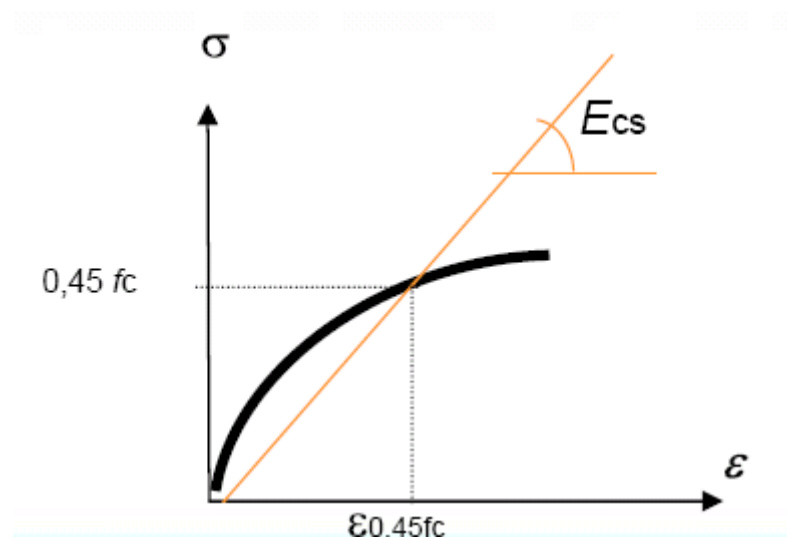


Figura 3.2.2 – E_{cs} é definido como secante da curva tensão-deformação, traçada do ponto de tensão nula até a tensão de compressão equivalente a $0,45 \cdot f_c'$.

E dependendo-se do tipo de concreto utilizado, o coeficiente da raiz quadrada poderia ser substituído por 4.700 para concretos de densidades normais, independente do tipo de agregado. Segundo VASCONCELLOS (1998), concretos com baixa densidade, 1.500 Kg/m^3 teriam a seguinte expressão, $2.500 \sqrt{f_c'}$, enquanto concretos com densidade normal, 2.500 Kg/m^3 resultariam em $5.400 \sqrt{f_c'}$. Portanto a média entre esses dois valores seria 3.950 e não 4.700, como proposto pela norma, tornando a fórmula pouco precisa, tendendo a reduzir os valores de módulo para concretos leves e aumentar para concretos de maior densidade.

No Código Modelo CEB-FIP Model Code 90, para concretos de densidade normais, a seguinte expressão pode ser usada:

$$E_c = 2,15 \cdot 10^4 \cdot (f_{cm}/10)^{1/3}$$

onde:

E_c : Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias

$f_{cm} = f_{ck} + 8$, e o f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão

A expressão acima foi desenvolvida para concretos com agregados quartizíticos. Na alteração do tipo de agregado empregado, a correlação com a tabela 3.2.1 torna-se necessária.

Tipo de Agregado	α_e
Basalto, calcário denso	1,2
Quartzo	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Tabela 3.2.1 – Efeito do tipo de agregado no módulo de elasticidade

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

A expressão para cálculo do ACI 318 é válida para concretos com valores de resistências a compressão até 41 Mpa e CEB-FIP-90, para resistências até 80Mpa.

A tabela 3.2.2 a seguir, apresenta valores para o módulo de elasticidade com base nas duas normas internacionais em concretos de densidade normal (2.320 Kg/m³).

ACI 318		CEB-FIP-90	
f_{cm} (Mpa)	E_c (GPa)	f_{cm} (Mpa)	E_c (GPa)
21	21	21	28
27	25	27	30
34	28	34	32
41	30	41	34

Tabela 3.2.2 – Módulos de elasticidade para concretos de densidade normal com agregados quartizíticos.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

Segundo MEHTA (2008), os valores apontados na tabela 3.2.2 devem ser considerados apenas como estimativas. Isso porque as características da zona de transição na interface e do estado de umidade das peças, no momento dos ensaios, contribui de forma diferente nos valores de resistência e módulo de elasticidade.

NEVILLE (1997) aponta com segurança que o crescimento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão.

A Norma Brasileira NBR 6118:03, que passou a vigorar em 2004, trouxe mudanças e ajustes para diferentes classes de concreto em relação à antiga NB-1 editada em 1978.

Enumera que os ensaios para determinação dos módulos estáticos de elasticidade e deformação e da curva de tensão – deformação devam ser obtidos com base na ABNT NBR 8522:03. Considera o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% da carga de ruptura, ou outra tensão especificada em projeto.

Para os casos, onde há ausência de ensaios e para idades iguais ou superiores a 7 dias, a norma permite utilizar a seguinte expressão:

$$E_{ci} = 5.600 \sqrt{fck}$$

onde:

E_{ci} : Módulo de elasticidade tangente inicial cordal.

fck : Resistência a compressão do concreto a 28 dias

A figura 3.2.3, apresenta a curva tensão x deformação a partir dos ensaios enumerados na NBR 8522:2003 a 30% da tensão de ruptura.

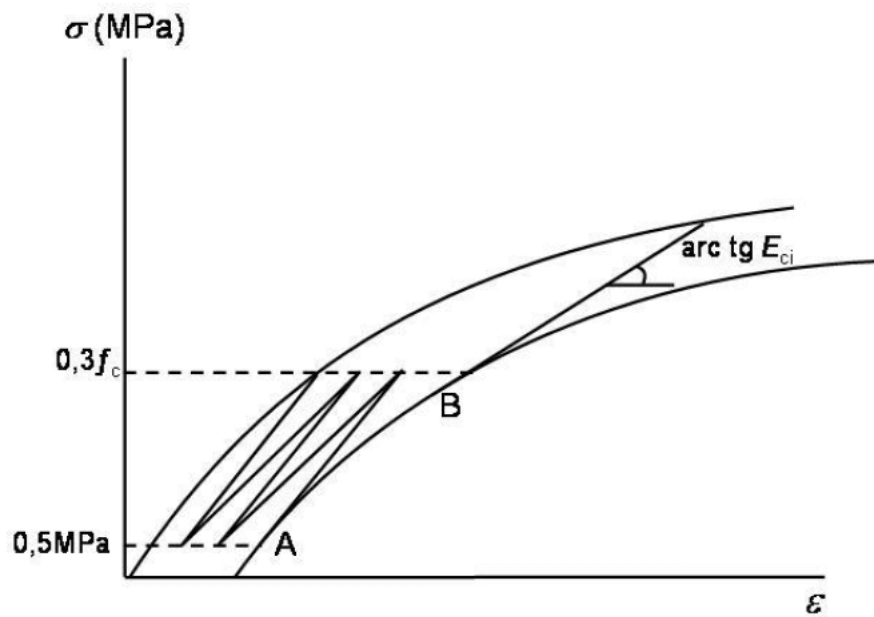


Figura 3.2.3 – Representação esquemática do módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente inicial

Fonte: NBR 8522:2003

Para análises elásticas de projeto, especialmente na determinação de esforços solicitantes e verificação de estados limites de serviço, permite adotar um módulo secante (E_{cs}), que é função do módulo tangente inicial, como apresentado a seguir na figura 3.2.4.

$$E_{cs} = 0,85 \cdot E_{ci}$$

E_{cs} : Módulo de elasticidade secante

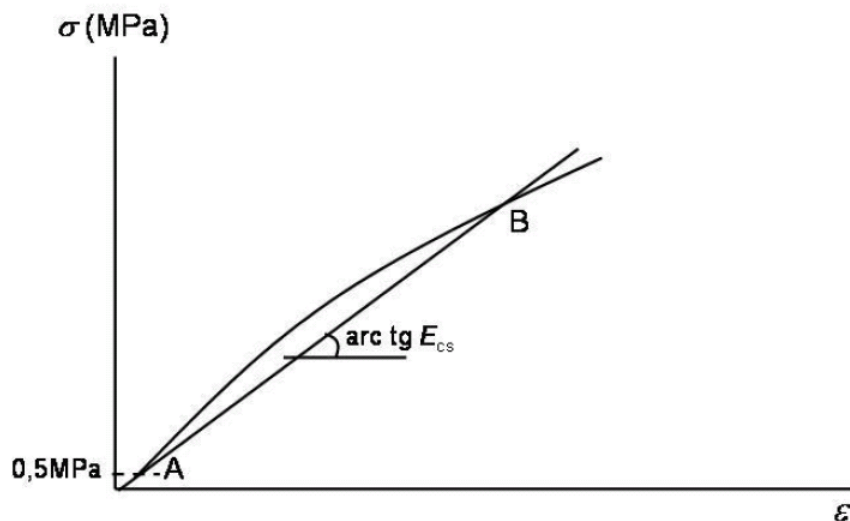


Figura 3.2.4 – Representação esquemática do módulo de deformação secante

Fonte: NBR 8522:2003

Na avaliação do comportamento de elementos estruturais ou de uma seção transversal, pode-se adotar o mesmo valor para o módulo à tração e à compressão, igualmente ao módulo de elasticidade secante.

A figura 3.2.5 apresenta um gráfico comparativo relacionando os diferentes modelos de previsão de módulo de elasticidade ilustrados nesse capítulo, bem como, suas diferenças em resultado, para concretos ditos normais.

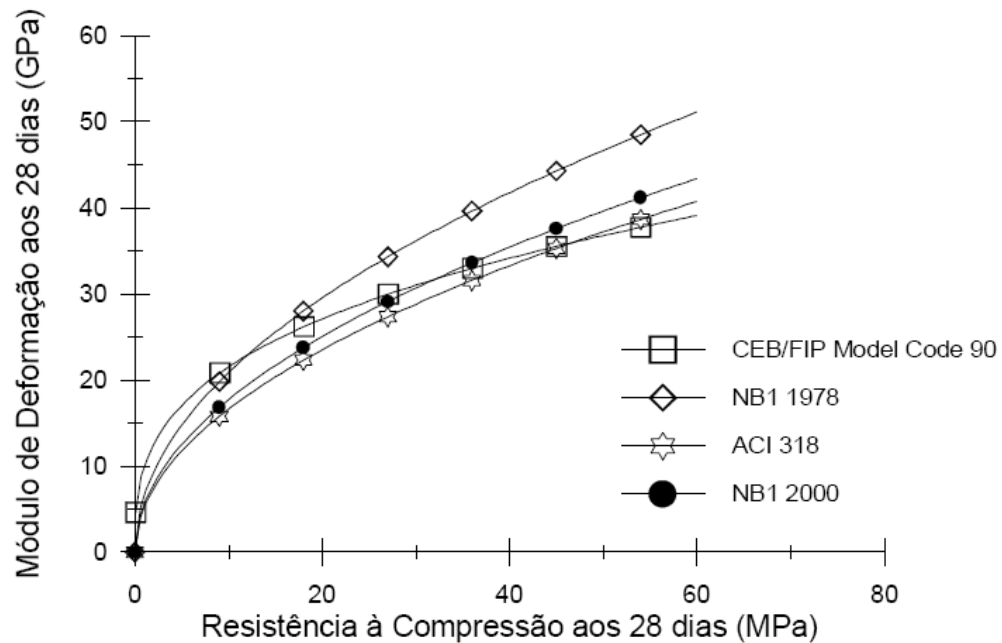


Figura 3.2.5 – Comparativo gráfico dos diversos modelos de previsão para o módulo de deformação.

Fonte: MELO NETO; HELENE (2002)

A versão atualizada da NBR 8522 que passou a vigorar em 2008 simplifica o uso, minimizando a variabilidade dos ensaios descaracterizando os planos de carga, até então utilizados, passando a adotar para o cálculo a média das deformações e não dos valores de módulo, conforme apresentando na figura 3.2.6.

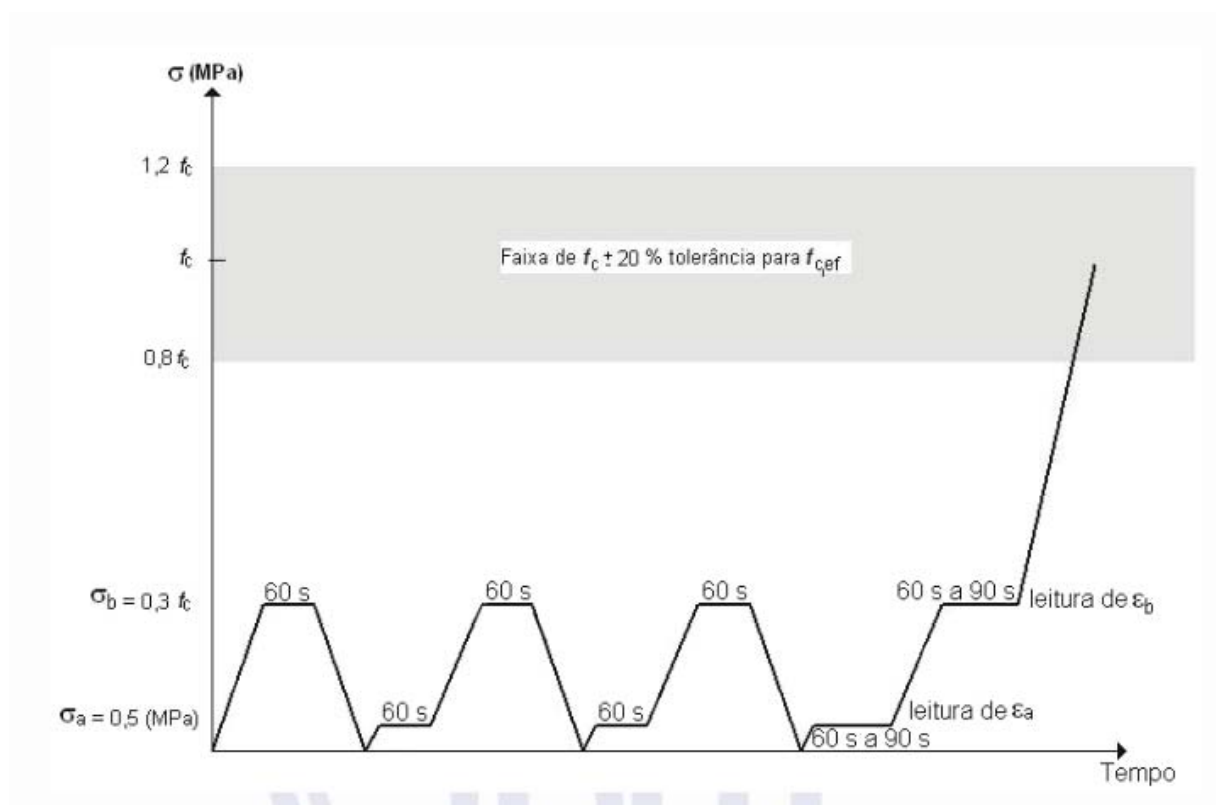


Figura 3.2.6 – Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade

Fonte: NBR 8522:2008

O módulo de elasticidade, E_{ci} em gigapascal, é dado pela expressão:

$$E_{ci} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\epsilon_b - \epsilon_a} 10^{-3}$$

onde:

σ_b é a tensão maior, em megapascal; ($\sigma_b = 0,3.f_c$);

0,5 é a tensão básica, expressa em megapascal (MPa);

ϵ_b é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior;

ϵ_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão básica (0,5MPa).

3.3 Principais fatores que contribuem para o aumento das deformações.

Muitos fatores podem contribuir para o aumento das deformações em estruturas de concreto ao longo do tempo. Critérios para controle e minimização desses elementos nas baixas idades, promoverão melhorias no comportamento das estruturas para o decorrer dos anos. A preocupação com a maturidade do concreto no instante dos primeiros carregamentos e a magnitude dessas cargas, são pontos indispensáveis para um bom desempenho além das decisões estabelecidas em projeto.

Em materiais não homogêneos, como é o caso do concreto, a variação dos elementos componentes influenciam diretamente em suas propriedades. A tabela 3.3.1 apresenta de forma esquemática alguns fatores de dosagem que podem diretamente maximizar ou minimizar os valores de módulo de elasticidade do concreto.

Módulo de Elasticidade			
Variação dos parâmetros de Dosagem		Variação do Módulo mantendo Fator a/c =constante	Variação do Módulo mantendo Abatimento =constante
Fator a/c	↑	—	↓
	↓	—	↑
Abatimento	↑	↓	—
	↓	↑	—
Consumo de cimento	↑	↓	↑
	↓	↑	↓
Teor de agregados (m)	↑	↑	↓
	↓	↓	↑
Volume de pasta	↑	↓	↑
	↓	↑	↓

Onde: ↑ = Aumento; ↓ = Diminuição; — = Sem análise

Figura 3.3.1 - Influência dos parâmetros de dosagem no módulo de elasticidade

Fonte: NETO; HELENE (2002)

Complementando esses fatores, a densidade, o módulo dos agregados, a proporção volumétrica, além das características da zona de transição, também contribui diretamente no comportamento elástico do compósito.

Segundo MEHTA (2008), quando o concreto é exposto às condições atmosféricas normais, os processos de retração térmica e retração por secagem, causam pequenas fissuras na zona de transição, mesmo antes de receber qualquer carregamento.

A **zona de transição** tem papel importante na determinação dos valores de módulo, pois nela, além das micro-fissuras existentes, cristais de hidróxido de cálcio provenientes da hidratação do cimento que ficam retidos, bem como, vazios capilares oriundos da exsudação, podem trazer consequências indesejadas para a composição do concreto.

A figura 3.3.2 ilustra a evolução das micro-fissuras na zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados sob carregamento uniaxial crescente em quatro estágios diferentes.

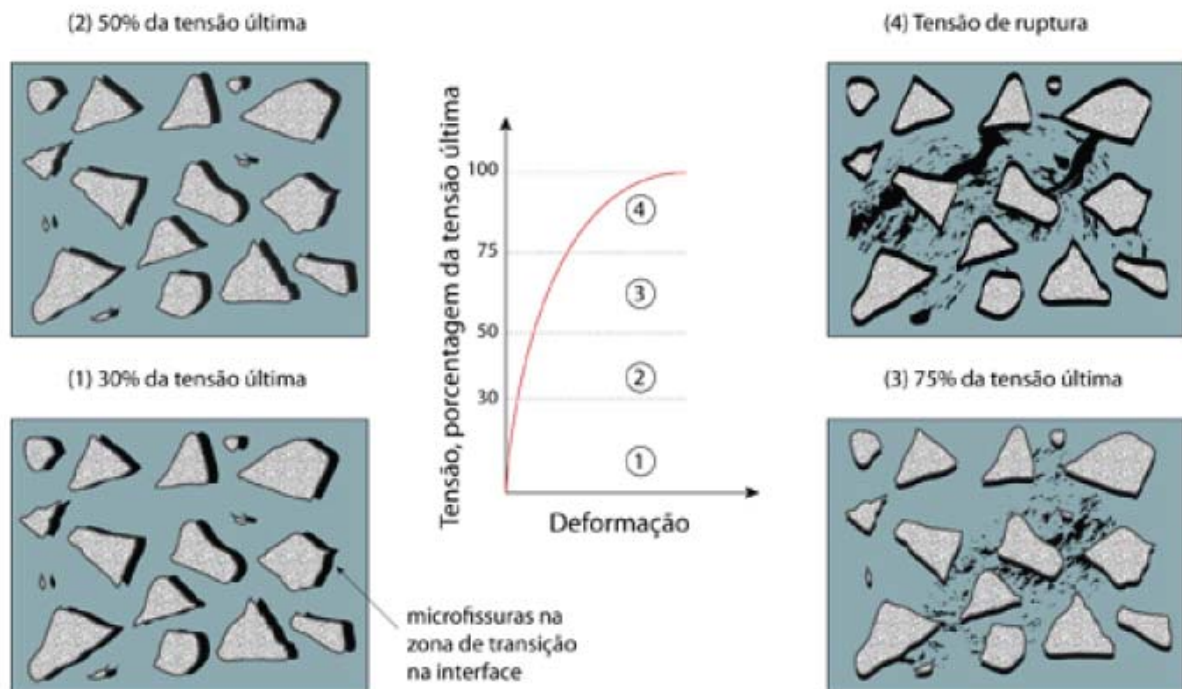


Figura 3.3.2 – Micro-fissuração do concreto decorrente do nível de tensão aplicada

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

Concretos com alto índice de porosidade, falhas nos processos de lançamento, adensamento e cura, dentre outros fatores, são os mais afetados com enfraquecimento dessa interface, proporcionando por consequência, baixos valores para o módulo de elasticidade. Em contrapartida, concretos bem dosados mostraram ganhos de resistência inferior à evolução do módulo em idades mais avançadas, apresentados na figura 3.3.3, a seguir. Tal fato se comprova, segundo MEHTA (2008), pelos efeitos benéficos originados pela melhoria da densidade na zona de transição, resultante da lenta interação química entre agregados e pasta de cimento.

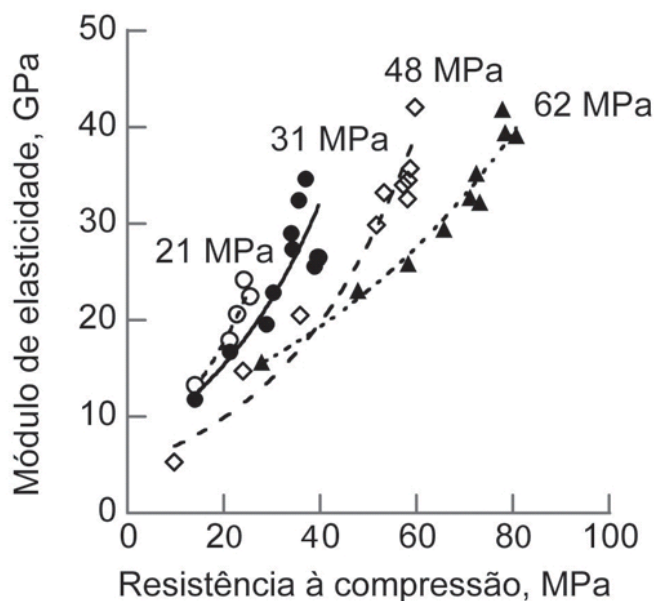


Figura 3.3.3 – Evolução da resistência e do módulo de elasticidade para diferentes concretos

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

Os **agregados** influenciam significativamente nos resultados do módulo de elasticidade do concreto, em específico os agregados graúdos. Suas características reológicas, formato e rigidez podem incrementar as resistências na interface pasta-agregado contribuindo para uma melhoria no valor do módulo do concreto.

PEREIRA NETO (1994) verificou que a zona de transição é diferenciada pela natureza do agregado em seu estudo sobre as características de módulo de algumas rochas. A tabela 3.3.2 apresenta alguns resultados para diferentes tipos de rochas.

Rochas	fr (Mpa)	E (GPa)
Basalto	54	73
Calcário	130	79
Diabásio	141	75
Gnaisse	209	81
Granito	150	62

Tabela 3.3.2 – Resistência e Módulo de elasticidade de algumas rochas

Fonte: PEREIRA NETO (1994)

Na dosagem dos concretos realizados a partir desses agregados, e utilizando-se cimento CP-II 32, microssilica, aditivo super-plastificante e relação água-cimento igual a 0,28, apresentou os seguintes resultados enumerados na tabela 3.3.3, a seguir.

Rochas	Concreto fc28 (Mpa)	Ø19 mm Ec28 (Gpa)
Basalto	85	44
Calcário	80	39
Diabásio	94	38
Gnaiss	89	35
Granito	86	33

Tabela 3.3.3 – Valores de módulo de elasticidade do concreto em função do tipo de agregado utilizado.

Fonte: PEREIRA NETO (1994)

A tabela 3.3.4 apresenta vários tipos de agregados ensaiados e suas respectivas curvas de correlação, bem como, a resistência característica do material e a faixa de aplicação em que se enquadrariam nos concretos.

Referência ⁽¹⁾	Tipo de agregado gráudo	Equação de correlação	Faixa de aplicação (MPa)
Carrasquillo <i>et al.</i> (1981)	calcário e seixo	$E = 3320.f_c^{1/2} + 6900$	$21 \leq f_c \leq 83$
Shih <i>et al.</i> (1989)	calcário	$E = 4660.f_c^{1/2} - 1370$	$21 \leq f_c \leq 83$
Almeida (1990) ⁽²⁾	calcário e granito	$E = 5330.f_c^{1/2}$	$40 \leq f_c \leq 120$
EC2 (1992)	quartzo	$E = 9500.f_c^{1/3}$	----
Shehata <i>et al.</i> (1993)	gnaisse	$E = 4250.f_c^{1/2}$	$f_c \leq 90$
Gomes (1995)	traquito e gnaisse	$E = 8142.f_c^{0,37}$	----
Ferrari <i>et al.</i> (1996)	calcário e gnaisse	$E = 3691.f_c^{1/2} + 5445$	$10 \leq f_c \leq 81$
Dal Molin e Monteiro (1996)	basalto	$E = 9570.f_c^{0,31}$	$30 \leq f_c \leq 90$
Radain <i>et al.</i> (1993)	basalto	$E = 2173.f_c^{1/2} + 1456$	$40 \leq f_c \leq 90$

Notas:
⁽¹⁾ Todas as referências foram retiradas de Silva (1997).
⁽²⁾ Utilizou corpos-de-prova prismáticos de 15 cm de aresta para determinação da resistência à compressão.

Tabela 3.3.4 – Módulo de elasticidade para diversos tipos de agregados

Fonte: SANTOS, C.F.; *et al.* (2006)

ARNDT; *et al.*, 2007, complementam que agregados graúdos com formato lamelar, podem aumentar o consumo de cimento por metro cúbico de concreto em relação a agregados com grãos cúbicos. Em estudo laboratorial realizado na região de Porto Alegre obteve diferenças da ordem de 10% na resistência a compressão dos concretos, bem como, economias de 15 Kg de cimento, dependendo simplesmente da seleção do formato cúbico para traços de mesma resistência, ilustrados na figura 3.3.4. Esse ganho, proveniente, da escolha do agregado graúdo, possibilita, outros ajustes como a redução do teor de argamassa no traço do concreto, minimizando, ainda mais, o consumo de cimento das misturas.



Figura 3.3.4 – Formato dos agregados graúdos utilizados no concreto em ensaios realizados no laboratório.

<1> grãos lamelares – brita comum

<2> grãos cúbicos

Fonte: ARNDT; *et. al.*, 2007

A figura 3.3.5 apresenta a variação do módulo de elasticidade para diferentes agregados graúdos em relação à resistência à compressão obtida, e justifica o fato de que, o formato quebradiço e as superfícies angulares, para os agregados graúdos beneficiam, consideravelmente, os concretos em termos de resistência e módulo. E que a compatibilidade dos materiais na produção dos concretos é um fator crítico para o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas.

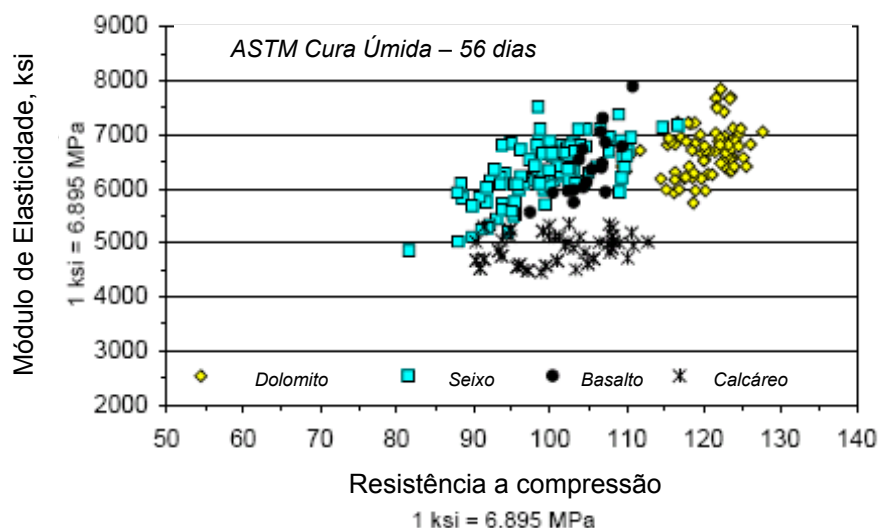


Figura 3.3.5 – Módulo de Elasticidade x Resistência à compressão para diferentes agregados graúdos

Fonte: MEYERS (1999)

Segundo MEHTA (2008), os agregados possuem diferentes deformações residuais e se comportam de maneira distinta na composição do concreto reforçando o princípio de que devemos conhecer o concreto para cada determinada aplicação.

A figura 3.3.6 mostra quatro diferentes tipos de agregados ensaiados sobre carregamento e posterior descarregamento, onde a deformação residual é notada ao final do ensaio.

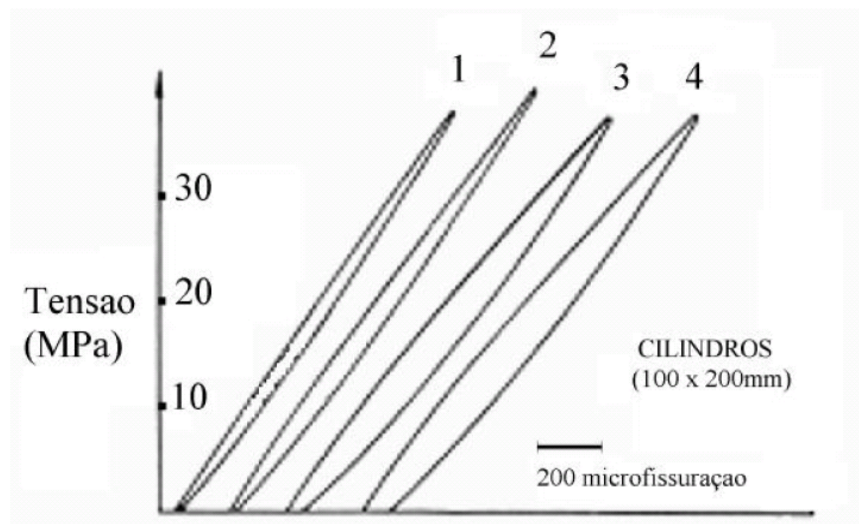
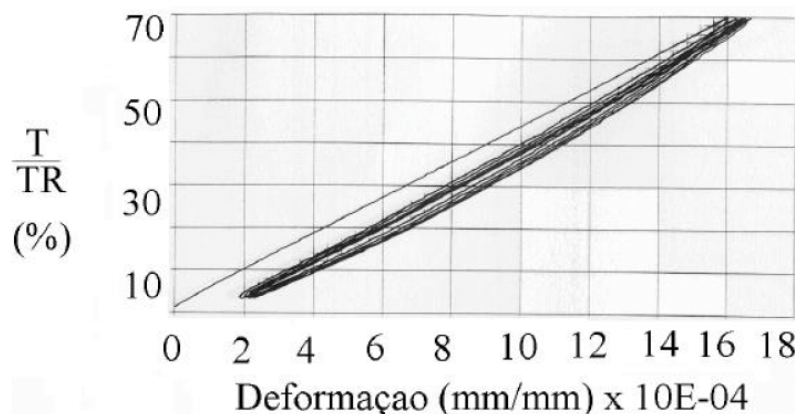


Figura 3.3.6 – Ensaio de histerese em concretos com idade de 28 dias
1 – Calcário; 2 – Diabásio; 3 – Granito; 4 – Seixo

Fonte: AITCIN; MEHTA (1990)

A reologia, forma, composição e propriedade dos agregados demonstram sua extrema importância e reforçam a necessidade de um perfeito elo de ligação com a pasta de cimento, na interface da zona de transição.

PEREIRA NETO (1994), reforça essa teoria demonstrando em um estudo sobre deformação com descarregamento, resultados semelhantes.



Fonte: PEREIRA NETO (1994)

Figura 3.3.7 – Diagrama tensão – deformação sob ciclos de carga e descarga a 70% da carga de ruptura do concreto com agregado granítico – Ø 25 mm e $f_c = 83,8$ Mpa.

A figura 3.3.8 demonstra a influência do agregado graúdo nos resultados do módulo de elasticidade e comprova a evolução crescente de valores, das baixas para as altas idades. Maiores teores desse agregado trazem ganhos nos valores de módulo de elasticidade a longo prazo. Tal fato pode ser explicado pela demora no processo de hidratação da pasta de cimento na zona de transição.

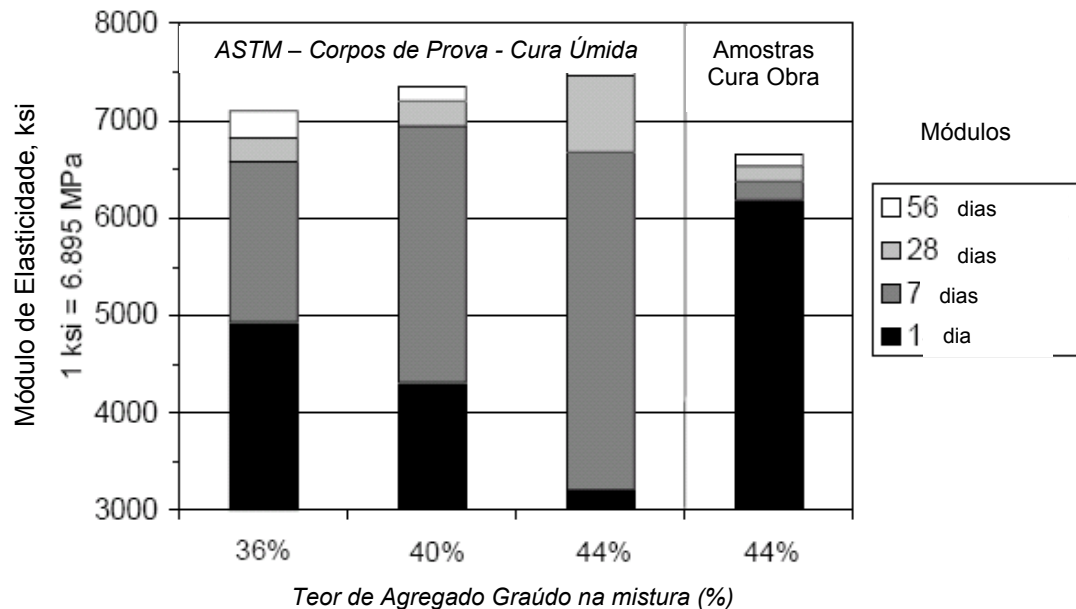


Figura 3.3.8 – Módulo de elasticidade em função do conteúdo de agregado graúdo e das condições de cura

Fonte: MEYERS (1999)

Outro ponto importante que contribui para aumento das deformações e requer conhecimento e estudos prévios é a **matriz da pasta de cimento**. Suas características e principais influências estão atreladas ao seu grau de porosidade, grau de hidratação, cura, temperatura, umidade, teor de ar incorporado e a relação água – cimento.

Ela contribui na composição do concreto com as parcelas de menores valores para o módulo, contra balanceando os elevados valores obtidos nos agregados.

De acordo com BATTAGIN (2010), a perda de água durante o processo de cura, é um dos principais responsáveis pela fluência no concreto, e que elevadas relações água-cimento para controle desse fenômeno tornam-se indesejáveis.

A figura 3.3.9, apresenta um comparativo dos diagramas tensão deformação entre o concreto e seus principais componentes.

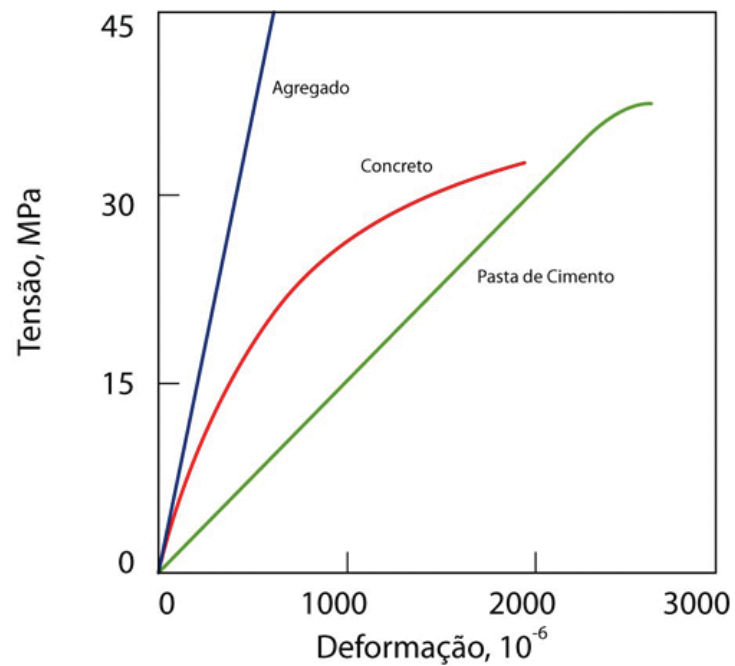


Figura 3.3.9 – Diagrama tensão – deformação para pasta de cimento, concreto e agregado.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

Os **parâmetros de ensaio**, também contribuem e podem trazer variações significativas para os resultados de módulo. A figura 3.3.10, sintetiza os fatores que interferem de maneira direta.



Figura 3.3.10 – Parâmetros de ensaio que interferem no módulo de elasticidade

Fonte: CUPERTINO; *et. al.* (2008)

Corpos de prova mantidos em cura úmida apresentam resultados mais altos que os mantidos à seco para módulo. Esse fato é inversamente percebido para o caso da resistência à compressão, onde os corpos de prova rompidos em condições a seco apresentam maiores valores de resistência. Segundo MEHTA (2008), a secagem do concreto parece produzir um efeito diferente na matriz da pasta de cimento e na zona de transição, onde a pasta ganha em resistência na força de atração de Van der Waals nos produtos da hidratação, enquanto que na zona de transição há perda de resistência devido à micro-fissuração.

Segundo a norma brasileira NBR 8522:2003 o tamanho dos corpos de prova para ensaio é fixado, onde os mesmos devem ser cilíndricos, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Alternativamente, outros corpos de prova que cumpram de forma geral os requisitos das NBR 5738 e NBR 7680 podem ser utilizados, sempre que respeitadas as devidas proporções entre comprimento/diâmetro em $L/d=2$. Para corpos de prova moldados, o diâmetro “d”, deve ser maior que quatro vezes o tamanho máximo nominal do agregado graúdo do concreto.

A velocidade do carregamento aplicada aos corpos de prova, também influencia nos resultados. Segundo o pesquisador RUSH, o concreto submetido a carregamentos com baixa velocidade de crescimento, apresenta uma diminuição de resistência de até 20% em relação aos valores obtidos em ensaios rápidos, modificando-se também os valores últimos das deformações.

A norma brasileira NBR 8522:2003 estabelece $(10 \pm 2) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ à velocidade para o aumento da deformação específica, após a aplicação do carregamento, em caso de prensa com controle de deformação. Ou propõe aumentar a tensão de forma regular à velocidade de $(0,25 \pm 0,05) \text{ Mpa/s}$, até que seja alcançada uma tensão de 30% da resistência à compressão do concreto.

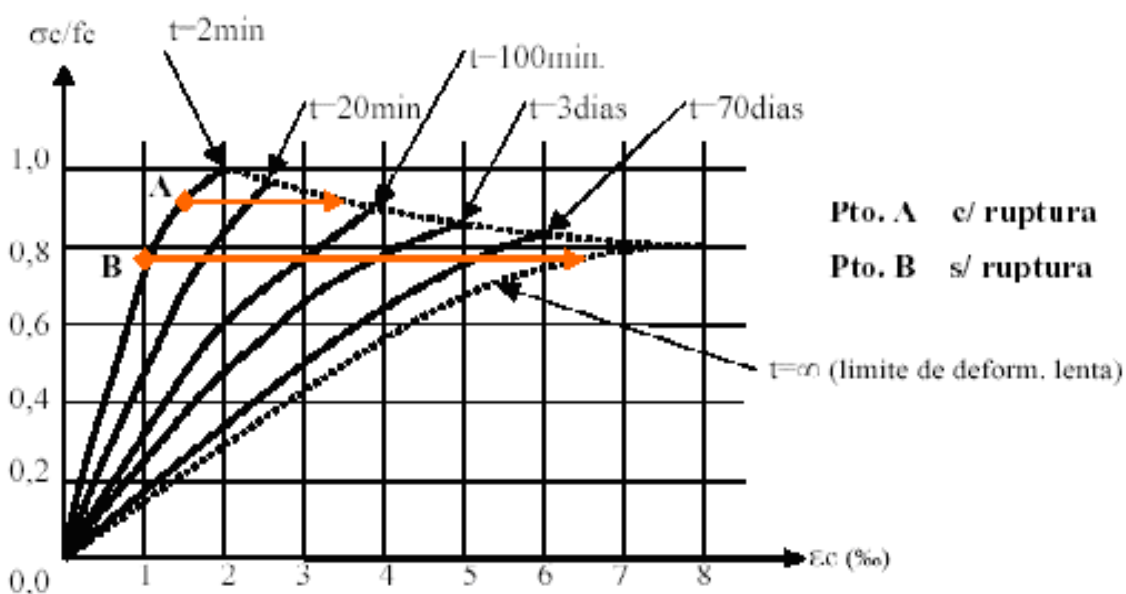
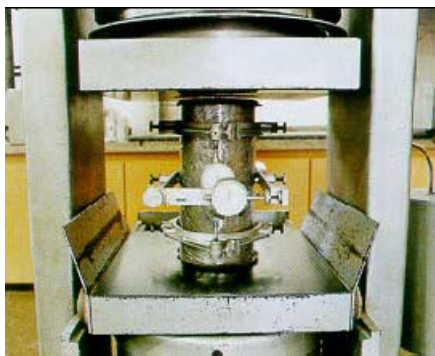


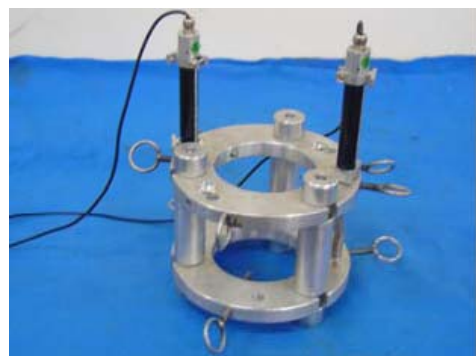
Figura 3.3.11 – Influência da velocidade de carregamento no concreto

CUPERTINO; *et. al.*, 2007, em estudo realizado com diferentes aparelhos de medição, atestaram variações nos resultados de módulo de elasticidade para esses casos e ressaltaram a importância em se conhecer a composição dos concretos para cada respectivo emprego, bem como, o preparo e os equipamentos adotados para medição de resultados em corpos de prova.

Ensaíram para um mesmo concreto, com apenas um tipo de agregado, quatro níveis de extensômetro, apresentados na figura 3.3.12, sendo: elétrico, mecânico, *strain-gage* e LVDT (Transformador diferencial de variação linear) e puderam constatar que nenhum extensômetro apresentou valores semelhantes nos ensaios.



Extensômetro mecânico



Extensômetro tipo LVDT –
Transformador diferencial de variação linear



Extensômetro elétrico



Extensômetro de colagem *strain-gage*

Figura 3.3.12 – Tipos de extensômetro utilizados no estudo de CUPERTINO; *et. al.* sobre fatores que interferem nos resultados de módulo

Fonte: CUPERTINO; *et al.* (2007)

A tabela 3.3.5 a seguir ilustra a variação dos resultados, médias, desvios padrões, e intervalos de confiança da média (95% de confiança), em função do tipo de medidor de deformação utilizado para corpos de prova ensaiados em réplicas com seis unidades e aleatorizados, afim de, minimizar os efeitos variáveis que não puderam ser mensurados. (CUPERTINO; *et. al.*, 2007)

Situação de Estudo			Nº de Corpos- de-prova	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Erro padrão (GPa)	Intervalo de Confiança -95% (GPa)	Intervalo de Confiança + 95% (GPa)
Dimensão	Extensômetro	Base de medida						
100x200	mecânico	maior	6	27,95	2,90	1,18	24,91	30,99
	mecânico	menor	6	22,97	1,22	0,50	21,69	24,24
	elétrico	maior	5	26,86	3,53	1,58	22,48	31,24
	elétrico	menor	6	29,73	1,34	0,55	28,32	31,14
	LVDT	maior	4	23,95	2,30	1,15	20,29	27,61
	LVDT	menor	5	21,50	1,90	0,85	19,14	23,86
	Strain gage	maior	5	29,24	3,89	1,74	24,41	34,07
	Strain gage	menor	6	34,08	2,43	0,99	31,54	36,63
150x300	mecânico	maior	6	25,03	0,99	0,41	23,99	26,08
	mecânico	menor	6	24,47	0,70	0,29	23,73	25,20
	elétrico	maior	6	29,05	1,08	0,44	27,92	30,18
	elétrico	menor	6	28,30	0,53	0,21	27,75	28,85
	LVDT	maior	5	31,30	2,98	1,33	27,60	35,00
	LVDT	menor	6	30,70	2,34	0,96	28,24	33,16
	Strain gage	maior	6	32,60	1,77	0,72	30,74	34,46
	Strain gage	menor	6	34,02	2,76	1,13	31,12	36,92
OBS.: - Bases de medida relativas: bases menores = 75mm (para dimensão 100x200) e 100mm (para dimensão 150x300) e bases maiores = 100mm (para dimensão 100x200) e 150mm (para dimensão 150x300). - Seis dos resultados individuais foram considerados como valores espúrios.								

Tabela 3.3.5 – Análise estatística dos resultados de ensaio realizados

Fonte: CUPERTINO; *et al.* (2007)

CUPERTINO; *et. al.* 2007, constataram que, em particular, os extensômetros mecânicos e elétricos obtiveram melhores resultados com menor dispersão de valores e menores erros nas medições realizadas. E que as interações dos efeitos analisados foram estatisticamente significativas, para cada extensômetro utilizado, dependendo do tamanho do corpo de prova ou base de medida, apresentando um comportamento distinto para os resultados de módulo de elasticidade.

3.3.1 Quais os cuidados necessários

A estrutura de concreto com o passar dos anos, sofreu grandes alterações desde a concepção até a sua execução. Os comportamentos estruturais também se alteraram com o decorrer do tempo. As novas misturas, os componentes químicos e as adições minerais, vêm incrementando os concretos atuais, melhorando significativamente seu desempenho e elevando sua resistência.

Com relação à estrutura, a preocupação está cada vez mais voltada para as primeiras idades. Muitos construtores estão se conscientizando de que os escoramentos devem permanecer por mais tempo em seus lugares e que carregamentos de materiais de construção precisam ser evitados sobre as lajes até que as resistências iniciais estejam dentro de limites aceitáveis, alterando com isso, a data de início dos serviços de vedações.

Para a minimização dos efeitos de deformação em estruturas de concreto, do ponto de vista técnico, algumas soluções construtivas devem abranger estudos sistêmicos para cada caso em particular, a fim de prever um bom funcionamento de

seus componentes. Muitos processos executivos tiveram que ser remodelados para atender soluções específicas de obra e também, problemas oriundos dessas alterações surgiram na interface estrutura – vedações causando, muitas das vezes, deslocamentos além do esperado. De forma abrangente é necessário se conhecer para cada etapa os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade, afim de, proporcionar um melhor resultado para os elementos estruturais.

Segundo BATTAGIN (2010), para diminuição dos fatores causadores de deformação em estruturas de concreto, cuidados com a secagem dos componentes deve ser tomado logo após a concretagem. A cura é um processo que tem grande influência nas primeiras idades, pois proporciona ganhos de resistência e módulo de elasticidade.

A figura 3.3.1.1 ilustra a grande importância da cura do concreto na evolução dos parâmetros de resistência ao longo do tempo.

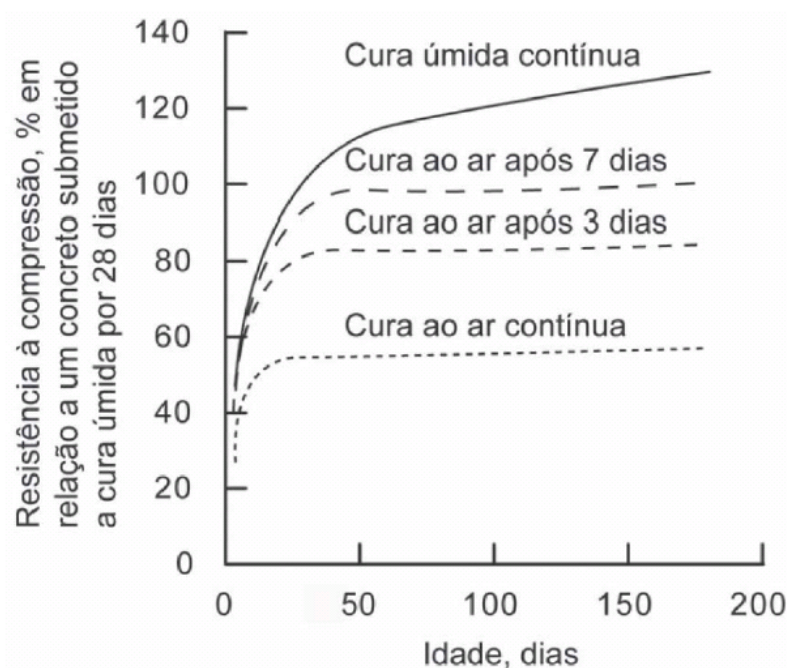


Figura 3.3.1.1 – Evolução da resistência do concreto ao longo do tempo. Comparativo entre a cura do concreto ao ar com a cura úmida por 28 dias.

Fonte: MEHTA; MONTEIRO (2008)

A NBR 6118:2003 recomenda que o concreto deva estar protegido contra agentes prejudiciais, enquanto não atingir endurecimento satisfatório. Mudanças bruscas de temperatura, chuva torrencial, produtos químicos, vibrações em demasia podem trazer problemas nas baixas idades e a proteção contra a secagem prematura, deverá ser realizada, no mínimo, por 7 dias após o lançamento e adensamento do concreto.

O processo de cura pode ser feito, simplesmente, por meio de represamento de água ou aspersão contínua. Ou ainda com a utilização de lonas plásticas, sacos

de aniagem, mantas geotêxteis umedecidas, emulsões acrílicas, ou aceleradas por meio de aditivos. Cura térmica e cura à vapor também são ótimas opções.

Ajustes na relação água – cimento, e cuidados com a temperatura no lançamento, se fazem necessários, pois ajudam a evitar a secagem prematura do concreto.

ZAMARION (2010) sintetiza os fatos e reitera que a escolha adequada dos componentes melhora substancialmente as propriedades para o lançamento, e o uso de concretos com resistência e módulo de elasticidade corretos, tornam a deformabilidade um elemento controlável.

Como a tendência segue no sentido oposto ao da rigidez, as deformações no concreto se dão à medida que as estruturas diminuem de tamanho tornando-se cada vez mais esbeltas, requerendo por sua vez, maior controle e atenção nos processos envolvidos. A relação tensão – resistência nos instantes de carregamento, não deve ser superior a 0,4. Para valores inferiores a 0,4, considera-se que a redução da fluência seja aproximadamente linear. Onde, por exemplo, essa relação for 0,20, pode-se dizer que haverá redução na fluência na ordem de 50%.

Para os casos onde essa relação passar de 0,40, por exemplo, para 0,60, esses valores serão tão prejudiciais, pois causarão micro-fissuras no concreto podendo até dobrar o valor de fluência da estrutura.

Do ponto de vista dos materiais, KUPERMAN (2007) enumera alguns fatores complementares que precisam ser controlados a fim de se reduzir os efeitos das deformações.

- A perda de água intracristalina na pasta de cimento;
- O processo de secagem;
- Aumento da temperatura durante o lançamento;
- O aumento do teor do agregado;
- Agregados com maior módulo de elasticidade.

Ainda tão importante quanto os parâmetros internos e externos que influem diretamente na deformação das estruturas, o conhecimento com propriedade do material concreto que será utilizado, torna-se extremamente necessário.

Os ensaios prévios para fluência do concreto realizados em laboratório devem seguir aos métodos internacionais aprovados e previamente reconhecidos.

Ensaio feitos em campo, por meio de instrumentação de estruturas, devem ser projetados, programados e planejados com antecedência, pois requerem que os instrumentos de medição estejam embutidos nos elementos estruturais em locais de maior probabilidade de deformação, previamente enumerados pelos projetistas.

Esses ensaios vêm ganhando espaço e representatividade nas últimas décadas, tornando-se ferramentas essenciais para projetistas e construtores. Cada vez mais comuns em construções, não somente de grande porte, como também, em estruturas de edifícios em concreto armado.

3.4 Variações de resultado na obtenção do módulo de elasticidade do concreto

Nas pesquisas e ensaios realizados para a ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, em laboratório, que auxiliaram na revisão da Norma Brasileira, HELENE (1998) comprova os fatores e as variâncias mencionados anteriormente.

As tabelas 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 ilustram outros aspectos que interferem nos valores de módulo de elasticidade, como, as relações água cimento, a consistência do concreto fresco, as diferenças de volume da pasta de cimento por metro cúbico de concreto, a própria resistência à compressão e idade do concreto no ensaio. Até então as diferenças eram relativas à natureza e diâmetro dos agregados graúdos, umidade dos corpos de prova ensaiados, velocidade de carregamento, dimensões dos corpos de prova e a temperatura de ensaio.

O experimento fixou as seguintes variáveis independentes como sendo a consistência para o concreto fresco com abatimentos: seco (50 ± 5) mm, plástico (100 ± 10) mm e fluido (200 ± 25) mm. Os traços em massa seca sendo 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 e 1:7. A idade de ruptura aos 3, 7, 28, 63, 91, 182 e 364 dias. Areia quartzosa de rio, lavada, brita 1 de granito, cimento CP II E 32 com massa específica de 3.090 kg/m³, e sem adição de aditivos minerais.

As variáveis intervenientes como sendo a massa específica do concreto fresco, consumo de cimento por metro cúbico de concreto, consumo de água por metro cúbico de concreto, teor de ar aprisionado, teor de argamassa seca em massa, volume de pasta por metro cúbico de concreto e o volume dos agregados por metro cúbico de concreto.

Os valores buscados no experimento foram: a resistência à compressão, o módulo de elasticidade inicial e o módulo de elasticidade secante a 0,4 da tensão de ruptura.

Resistência à compressão – f_c para as idades apresentadas;
Módulo de elasticidade inicial – E_{ci} para as idades apresentadas;
Módulo de elasticidade secante – E_c para as idades apresentadas.

Volume de pasta de concreto por metro cúbico – c_1
Volume de agregados por metro cúbico – c_2

Descrição	unid.	traço 1:3	traço 1:4	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:7
Abatimento	mm	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5
Relação água/cimento	Kg/Kg	0,338	0,423	0,514	0,617	0,700
Teor de argamassa seca	%	55	55	55	55	55
Massa específica	Kg/m ³	2382	2391	2377	2322	2321
Consumo de cimento	Kg/m ³	548	440	364	303	266
Consumo de água	Kg/m ³	185	186	187	187	187
Teor de ar - volume	%	1,2	1,8	1,7	2,3	2,8
Volume em pasta (c1)	%	0,366	0,340	0,316	0,304	0,297
Volume de agregado (c2)	%	0,634	0,660	0,684	0,696	0,703
<i>fc</i> 3 dias	MPa	46,2	27,1	18,1	15,0	6,9
<i>fc</i> 7 dias	MPa	53,7	36,3	22,1	18,8	10,8
<i>fc</i> 28 dias	MPa	62,1	48,0	36,1	26,0	17,0
<i>fc</i> 63 dias	MPa	64,0	52,1	40,0	27,8	17,5
<i>fc</i> 91 dias	MPa	67,0	54,5	41,9	28,8	18,6
<i>fc</i> 182 dias	MPa	67,8	56,5	45,0	29,7	19,5
<i>fc</i> 364 dias	MPa	68,4	58,3	46,5	30,9	20,4
<i>Eci</i> 3 dias	GPa	40,4	31,6	30,7	27,4	21,8
<i>Eci</i> 7 dias	GPa	42,5	37,3	30,6	30,9	24,9
<i>Eci</i> 28 dias	GPa	40,5	39,0	34,8	30,6	23,0
<i>Eci</i> 63 dias	GPa	42,7	39,6	35,4	34,7	27,7
<i>Eci</i> 91 dias	GPa	45,7	42,1	38,5	33,8	33,1
<i>Eci</i> 182 dias	GPa	45,9	43,2	39,3	34,8	30,3
<i>Eci</i> 364 dias	GPa	46,1	43,7	41,0	34,8	31,6
<i>Ec</i> 3 dias	GPa	35,6	30,6	28,7	25,6	20,4
<i>Ec</i> 7 dias	GPa	39,7	34,9	28,5	28,9	22,2
<i>Ec</i> 28 dias	GPa	39,9	36,1	32,2	27,9	21,7
<i>Ec</i> 63 dias	GPa	41,2	37,1	34,2	30,2	21,6
<i>Ec</i> 91 dias	GPa	43,8	38,2	34,9	31,1	29,9
<i>Ec</i> 182 dias	GPa	43,0	40,4	38,4	32,6	28,4
<i>Ec</i> 364 dias	GPa	43,1	40,8	38,4	33,1	29,8

Tabela 3.4.1 - Resultados obtidos para os traços de consistência **seca**

Fonte: HELENE (1998)

descrição	unid.	traço 1:3	traço 1:4	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:7
Abatimento	mm	100±10	100±10	100±10	100±10	100±10
Relação água/cimento	Kg/Kg	0,382	0,475	0,574	0,677	0,791
Teor de argamassa seca	%	55	55	55	55	55
Massa específica	Kg/m ³	2360	2353	2341	2295	2279
Consumo de cimento	Kg/m ³	539	431	357	299	259
Consumo de água	Kg/m ³	206	205	205	202	205
Teor de ar - volume	%	1,5	1,7	2,1	1,8	2,5
Volume em pasta (c1)	%	0,387	0,355	0,336	0,312	0,310
Volume de agregado (c2)	%	0,613	0,645	0,664	0,688	0,690
<i>fc</i> 3 dias	MPa	34,8	20,2	12,9	8,8	6,1
<i>fc</i> 7 dias	MPa	40,9	30,8	20,9	12,3	9,5
<i>fc</i> 28 dias	MPa	51,4	41,1	33,4	18,8	14,4
<i>fc</i> 63 dias	MPa	55,3	46,0	38,0	22,7	16,1
<i>fc</i> 91 dias	MPa	61,1	50,1	41,4	24,6	17,5
<i>fc</i> 182 dias	MPa	62,9	52,7	43,9	26,9	18,4
<i>fc</i> 364 dias	MPa	65,6	55,3	46,3	28,8	20,3
<i>Eci</i> 3 dias	GPa	33,7	29,1	24,2	21,3	18,8
<i>Eci</i> 7 dias	GPa	34,5	32,3	28,4	23,8	21,8
<i>Eci</i> 28 dias	GPa	31,3	35,6	32,3	20,5	22,4
<i>Eci</i> 63 dias	GPa	35,2	37,0	36,6	30,3	26,0
<i>Eci</i> 91 dias	GPa	37,6	38,0	34,3	32,0	26,8
<i>Eci</i> 182 dias	GPa	39,7	38,7	36,4	30,9	29,2
<i>Eci</i> 364 dias	GPa	41,0	37,3	37,0	31,6	28,5
<i>Ec</i> 3 dias	GPa	31,5	26,3	20,6	19,9	15,6
<i>Ec</i> 7 dias	GPa	33,3	30,3	29,0	22,3	19,0
<i>Ec</i> 28 dias	GPa	31,9	33,3	26,6	22,3	19,4
<i>Ec</i> 63 dias	GPa	35,7	34,6	31,9	27,7	24,5
<i>Ec</i> 91 dias	GPa	36,2	33,0	32,8	28,1	25,1
<i>Ec</i> 182 dias	GPa	38,4	36,2	34,1	28,9	25,0
<i>Ec</i> 364 dias	GPa	38,9	36,8	34,2	28,6	25,9

Tabela 3.4.2 - Resultados obtidos para os traços de consistência **plástica**

Fonte: HELENE (1998)

descrição	unid.	traço 1:3	traço 1:4	traço 1:5	traço 1:6	traço 1:7
Abatimento	mm	200±25	200±25	200±25	200±25	200±25
Relação água/cimento	Kg/Kg	0,400	0,506	0,606	0,717	0,824
Teor de argamassa seca	%	55	55	55	55	55
Massa específica	Kg/m ³	2363	2338	2339	2314	2305
Consumo de cimento	Kg/m ³	538	425	355	300	262
Consumo de água	Kg/m ³	215	215	215	215	216
Teor de ar - volume	%	1,2	1,1	1,2	1,3	1,3
Volume em pasta (c1)	%	0,393	0,357	0,336	0,320	0,310
Volume de agregado (c2)	%	0,607	0,643	0,664	0,680	0,690
<i>fc</i> 3 dias	MPa	30,9	20,4	13,1	8,8	5,5
<i>fc</i> 7 dias	MPa	36,3	29,9	19,6	11,7	8,4
<i>fc</i> 28 dias	MPa	46,5	37,2	27,7	18,0	13,8
<i>fc</i> 63 dias	MPa	50,9	40,0	33,5	20,4	15,2
<i>fc</i> 91 dias	MPa	53,0	42,5	34,0	20,9	17,2
<i>fc</i> 182 dias	MPa	55,7	44,6	34,1	22,1	18,6
<i>fc</i> 364 dias	MPa	57,7	46,2	36,8	23,1	20,0
<i>Eci</i> 3 dias	GPa	26,6	26,1	20,1	19,7	14,7
<i>Eci</i> 7 dias	GPa	31,6	29,6	25,7	21,6	19,4
<i>Eci</i> 28 dias	GPa	34,3	32,6	26,0	23,8	22,8
<i>Eci</i> 63 dias	GPa	35,9	28,1	30,5	26,2	23,7
<i>Eci</i> 91 dias	GPa	35,3	33,3	30,9	26,1	24,6
<i>Eci</i> 182 dias	GPa	36,9	33,8	30,9	25,9	25,2
<i>Eci</i> 364 dias	GPa	36,4	34,2	28,9	25,8	25,2
<i>Ec</i> 3 dias	GPa	25,6	24,8	18,9	17,8	16,0
<i>Ec</i> 7 dias	GPa	30,1	28,2	24,5	20,6	18,4
<i>Ec</i> 28 dias	GPa	32,7	28,4	23,6	22,6	21,8
<i>Ec</i> 63 dias	GPa	33,7	31,1	29,0	25,0	22,5
<i>Ec</i> 91 dias	GPa	33,2	31,7	27,4	24,8	23,4
<i>Ec</i> 182 dias	GPa	33,2	32,2	29,5	25,5	23,5
<i>Ec</i> 364 dias	GPa	35,1	32,0	30,2	25,9	23,3

Tabela 3.4.3 - Resultados obtidos para os traços de consistência **fluida**

Fonte: HELENE (1998)

Com base nos resultados obtidos do experimento realizado, pode-se notar que os concretos com traço 1:3, nos três estados de consistência, apresentam de um modo geral, maiores valores para resistência à compressão, e seus respectivos módulos de elasticidade. O consumo de cimento em maior quantidade, em conjunto com a baixa relação água – cimento garante boa parte desses resultados.

Em contrapartida nos traços 1:7, nos três estados de consistência, o consumo de cimento em menores proporções, bem como, o aumento da relação água – cimento prejudicou os resultados minimizando tanto os valores de resistência à compressão quanto seus respectivos módulos de elasticidade.

HELENE (1998), verifica 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, significa um aumento do volume de pasta de cimento por metro cúbico de concreto, que vai interferir significativamente no módulo de elasticidade do concreto.

Pode-se concluir, com base nesse experimento, que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos melhora à medida que se enriquecem as misturas. Mantidas as devidas proporcionalidades, e garantindo boa trabalhabilidade das misturas de concreto, aumentando-se o teor de cimento, e reduzindo-se o fator água-cimento, estaríamos obtendo concretos mais resistentes, duráveis e menos deformáveis.

HELENE (1998) aconselha a utilização de um conjunto de resultados representativos para obtenção de valores para o módulo de elasticidade, e não somente devemos julgar um concreto por seus valores individuais. Dessa forma, a grande variabilidade de resultados, aparentemente sensíveis à dosagem e a composição do traço, estariam sendo minimizadas.

4. O MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA O PROJETISTA ESTRUTURAL

4.1 Frequentes dúvidas dos projetistas estruturais com relação ao módulo de elasticidade

Independente das alterações da Norma Brasileira e da versão em vigor, o fato, de que as estruturas de concreto armado, por questões arquitetônicas e mercadológicas, estão se tornando cada vez mais esbeltas e a deformabilidade passando a ser um elemento cada vez mais relevante e preponderante nos aspectos de utilização, desempenho e manutenção dos edifícios.

A NBR 12655 passou a exigir do projetista estrutural conhecimento das várias etapas da construção e definir parâmetros de controle para o instante da desforma. O ponto crítico seria: Quando o construtor poderá retirar os escoramentos?

Muitos profissionais não digerem o fato de que o módulo de elasticidade possa ser simplesmente obtido empiricamente a partir de valores de resistências à compressão. E que, cada expressão, tanto as elaboradas pelas normas nacionais, como internacionais apresentem valores com divergências nos resultados.

E como se não bastasse, para piorar ainda mais a questão, os valores para o módulo de elasticidade especificados em seus projetos, são questionados pelas concreteiras que, na maioria dos casos não conseguem atingir esse valor com o f_{ck} comprado pelas construtoras.

O fato é que, parte da solução está na percepção e minimização das variáveis que influenciam esses valores, em particular para cada região, e ainda, para cada tipo de obra.

4.1.1 Convivendo com as incertezas ou criando soluções?

Não seria nada produtivo adotarmos em projetos valores e especificações que os clientes construtores e as concreteiras fornecedoras não consigam atingir.

A Norma Brasileira NBR 6118 é fruto do resultado de esforços contínuos de muitos profissionais, acadêmicos e pesquisadores do ramo de construções e estruturas, portanto, é com base nela que devemos nos balizar e parametrizar os nossos projetos.

Cabe aos contratantes, fazer jus de suas recomendações, solicitando aos projetistas estruturais todas as especificações necessárias, tais como, fator água cimento, f_{ck} e módulo de elasticidade, e aos concreteiros todo suporte técnico e o compromisso na obtenção desses parâmetros. A construtora deve ter a comprovação final de que tudo saiu de forma correta, dentro das especificações da Norma, através de um preciso e coerente controle tecnológico.

Para o fato das variações de resultado, é interessante se adotar procedimentos que antecedam a contratação das concreteiras. Alimentado essa cadeia produtiva, o construtor deverá estar em comum acordo com o projetista estrutural que o auxiliará na contratação da empresa fornecedora de concreto. Aprofundando ainda mais, o projetista estaria, quase que avalizando a empresa e o concreto que será utilizado em sua obra.

Por meio de ensaios de laboratório, quando possível, realizar estudos prévios de correlação entre o f_{ck} , fator água cimento e o módulo de elasticidade para obtenção das curvas de crescimento de f_{ck} , do módulo, a curva de Abrams ($f_{ck} \times a/c$) e módulo de elasticidade $\times a/c$, que garantirão as propriedades do concreto empregado na obra para os agregados ensaiados e para uma determinada situação.

A NBR 8522 especifica que o ensaio de módulo por idade, deve ser realizado três corpos de prova ensaiados em prensa de carregamento contínuo. Com base nesse ensaio, e a partir da curva de crescimento obtida, parâmetros reais para a desforma poderão ser repassados aos construtores.

4.2 A necessidade e a evolução dos parâmetros de controle para as estruturas de concreto armado

A concepção da estrutura dada pelo projetista estrutural é o início da materialização do projeto arquitetônico.

Até bem pouco tempo atrás, a segurança estrutural era o elemento primordial para o dimensionamento das peças de concreto que compõem a estrutura. Após quinze anos de discussão, no âmbito do CEB – Comitê Euro Internacional do Concreto, os conceitos de durabilidade foram introduzidos no Código Modelo CEB - 90. A estrutura passou a ser vista como um “ser vivo”, que tem vida útil e está inserida dentro de um determinado ambiente.

A agressividade do ambiente ao concreto passou a ser um requisito inicial, mesmo antes da segurança estrutural, para dimensionamento do concreto e escolha dos materiais adequados.

A Norma Brasileira NBR12.655, define as responsabilidades dos atuantes na cadeia produtiva do concreto estrutural e, além dos fatores referentes à durabilidade, como relação água – cimento pede que o projetista estrutural defina o módulo estático de deformação do concreto no instante da desforma.

A falta de elementos para medida da execução, a descrença na evolução da mão de obra que, normalmente é utilizada nos serviços de concretagem, levou os projetistas a manter o f_{ck} do concreto na faixa de 15 a 25 Mpa, durante várias décadas.

Um estudo feito pela ABESC – Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Concretagem, no final da década de 90, com empresas fornecedoras de concreto responsáveis por 60% da distribuição do concreto da região, resultou em um *fck* médio de 18,2 Mpa.

Após a aprovação da NBR 6118:78, que tratava do projeto e execução de estruturas de concreto armado, a ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, através do CB-18, iniciou um processo de revisão das normas de Cimento Portland, introduzindo conceitos de variabilidade e autocontrole, adotados na Europa.

Os cimentos que passaram a ser utilizados por empresas de concretagem e grandes construtoras atingiam agora resistências à compressão da ordem de 40 Mpa aos 28 dias.

Esse patamar representou uma grande evolução a nível de otimização da produção nacional do produto. Entretanto, como todo processo construtivo de uma estrutura de concreto inicia-se no projeto, os agentes da cadeia produtiva, nessa fase, não tiraram proveito da melhoria do cimento para aumento do *fck*.

A manutenção do *fck* a níveis de 15 a 20 Mpa, permitiu que na dosagem do concreto, fosse possível utilizar consumos menores de cimento, com conseqüente aumento na relação água – cimento.

A relação água – cimento, que na década de 70 era da ordem de 0,54, para um concreto de 20 Mpa, passou na década de 90 para 0,75, ou mais.

As estruturas com *fck* mais altos, de 25 a 35 Mpa, exigindo apenas resistência à compressão, levou à deformações no longo prazo, com prejuízo da integridade das alvenarias, que passaram a sofrer processos de fissuração.

A partir daí, a resistência do concreto passou a ser aliada à exigência do conhecimento do módulo de deformação no instante da desforma, e tem levado à valores de *fck* para patamares ainda maiores, tornando as estruturas mais esbeltas, com maior número de pavimentos e com menor incidência de patologias nas alvenarias.

4.3 O controle tecnológico do concreto como parte do escopo de Projeto de Estruturas

Com a introdução da versão atualizada da norma brasileira NBR 6118:2003, alguns aspectos foram introduzidos e algumas questões tornaram-se mais visíveis e passaram a ser utilizadas com maior frequência e rigor. Uma reformulação geral do ponto de vista do cálculo estrutural e da durabilidade passou a integrar os processos criando vínculos inseparáveis com o controle tecnológico.

Dessa forma os parâmetros de cálculo do projetista estrutural estarão sendo verificados continuamente nas obras por meio de uma série de procedimentos e traduzidos em prol da qualidade para melhoria do sistema como um todo.

A NBR 6118 em seu item 5 ressalta o seguinte aspecto a ser garantido: *Requisitos gerais de qualidade da estrutura e avaliação da conformidade do projeto*, ou seja, existe a preocupação com a qualidade técnica do projeto, bem como, com a sua apresentação e facilidade no entendimento pelas equipes de produção que utilizarão esse projeto. O item 5.1.1 condições gerais reafirma tal ponto enumerando: *As estruturas de concreto devem atender aos requisitos mínimos de qualidade classificadas em 5.1.2 durante sua construção e serviço, e aos requisitos adicionais estabelecidos em conjunto entre o autor do projeto estrutural e o contratante.*

Esses requisitos e premissas adicionais ficaram no âmbito do projetista estrutural e seu Projeto que deverá contemplar e enumerar os controles necessários.

Aspectos relacionados ao controle podem ser verificados na NBR 12.655 em específico no item 4 que menciona as atribuições e responsabilidades. Além da responsabilidade pelo projeto estrutural ela atribui ao projetista especificar em documento os critérios relativos à durabilidade, englobando a propriedade dos materiais utilizados, tais como, f_{ck} para as etapas de construção, f_{cj} para uma determinada idade, módulo de deformação mínimo no instante da desforma, dentre outras propriedades que relacionam a estabilidade da estrutura.

Os critérios relacionados à execução devem estar incorporados nesse documento, como por exemplo, o sistema de cura a ser adotado para as peças e o tempo mínimo necessário.

Todas essas exigências são parâmetros recentes que deverão ser incorporados ao conjunto de projetos estruturais, onde as novas tendências precisam fazer parte do dia a dia desses profissionais. Conhecimentos cada vez mais aprofundados sobre tipos de cimento disponíveis no mercado, e quais as suas potencialidades, estudos de dosagem, e tecnologia do concreto, poderão trazer informações relevantes ao projetista. E, através desses elementos o projeto poderá beneficiar as obras antecipando, como por exemplo, a retirada das formas e escoramentos de um determinado pavimento com base em resultados obtidos para o módulo de elasticidade, resistência à compressão em uma determinada idade.

A ABECE, Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural, acredita que com todas essas inovações e recomendações técnicas, os projetos passarão por uma melhora no quesito qualidade, garantindo um padrão mínimo para as estruturas de concreto armado, beneficiando de certo modo, toda a cadeia produtiva da construção civil, aumentando, inclusive, a segurança para os usuários finais.

5. A RESPOSTA DAS CONCRETEIRAS AO PEDIDO DO PROJETISTA

5.1 Como é controlado o módulo de elasticidade nas condições de produção.

Por questões financeiras, muitas empresas acabam deixando de fazer o controle tecnológico do concreto em suas obras, e isso é um fato. Parece haver um consenso de que, se a concreteira faz esse tipo de controle, nada mais seria necessário.

A partir desse pensamento é que surgirão os problemas. Não servindo de alento e sim de uma necessidade eminente, a NBR12655 coloca como obrigatório esse controle na obra, pois o concreto não é somente um produto adquirido e sim um serviço contratado que necessita de padrões e controles específicos nos processos que o envolvem. Além de atrasar a obra e prejudicar o início de vários subsistemas da construção atrelados diretamente à estrutura, a falta de controle poderá trazer brigas judiciais totalmente indesejáveis aos participantes da cadeia produtiva, bem como, onerar todo o processo e consequentemente o custo global da obra.

Apesar das constatações as empresas que se preocupam com qualidade e com seus procedimentos de controle, começaram a tomar precauções para amenizar esses possíveis problemas, introduzindo além do controle de resistência à compressão, o controle para o módulo de deformação.

Muitos problemas relacionados à deformabilidade das estruturas estão em pauta na atualidade e os construtores cada vez mais preocupados com essa questão, vêm alterando seus processos de execução, afim de, minimizar essa problemática. Novos jogos de escoramento estão sendo introduzidos e mantidos em pavimentos recém concretados, assim como, uma demora consciente para o início dos serviços de alvenaria tem se percebido. A grande preocupação e o maior propósito, seria minimizar os efeitos da deformação imediata e como consequência, o da deformação lenta do concreto.

Além desses cuidados, muitas empresas construtoras, vêm adotando, em conjunto com os ensaios de resistência à compressão, ensaios de módulo de deformação do concreto de quatro em quatro pavimentos da estrutura, com resultados obtidos em laboratório por meio de corpos de prova moldados na obra, no instante da descarga do concreto.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa de medição e aferição do módulo de elasticidade, utilizando-se uma célula de fluência instalada na própria estrutura, que será demonstrada adiante.

5.2 É possível dosar o concreto para atender os requisitos do módulo de elasticidade?

AITCIN (2000) enumera dentre seus estudos sobre concreto de alto desempenho, a necessidade de pré-qualificação de empresas fornecedoras de concreto no Canadá e revela: *“O evento crítico de um tal programa de ensaios de pré-qualificação consiste na entrega de uma mistura experimental completa sob as mesmas condições daquelas que prevalecerão durante a obra....”*

Esse mesmo conceito deveria ser aplicado em nosso País com mais frequência, não somente em obras de grande porte, como também em casos menores e específicos, onde as exigências de projeto deveriam ser atestadas e comprovadas pelas concreteiras.

O que vemos em alguns casos diverge desse princípio. Muitas concreteiras alegam não conseguir atingir os parâmetros de módulo de elasticidade especificados nos projetos estruturais para determinados *fck*'s e que tal módulo somente seria capaz de ser obtido com valores maiores de *fck* contratados. Com isso, uma polêmica está lançada e caberá ao construtor saber conduzi-la para que não sejam gerados problemas futuros.

Esse fato, portanto, deve ser administrado pelo contratante, que na maioria dos casos é a construtora, onde os parâmetros fornecidos no projeto estrutural deverão ser atendidos em sua totalidade, independente da tecnologia e dos materiais adotados pelas concreteiras. Um preço fixo a ser contratado pelas construtoras deverá ser atrelado às especificações necessárias do projeto e não somente ao *fck* comumente negociado.

Com isso ganha espaço um novo profissional que passa a fazer parte da cadeia produtiva do concreto. O engenheiro tecnologista veio desempenhar essa função e não somente participando de problemas do campo de recuperação estrutural, estaria viabilizando em conjunto com os projetistas, novos concretos, realizando estudos laboratoriais, eliminando perdas e retrabalhos futuros, proporcionando ganhos de durabilidade e aumento da vida útil das estruturas.

Esse trabalho ilustrará mais adiante, um estudo de caso, onde o concreto foi previamente concebido para um determinado projeto, ensaiado em laboratório, para posteriormente ser aplicado na obra com as mesmas configurações de materiais do ensaio. Com os instrumentos de medição do módulo instalados na estrutura, pudemos atestar e confirmar esses valores.

5.3 Existe concreto específico sendo produzido apenas para atender o requisito do módulo?

As dificuldades encontradas provenientes do processo de contratação dos serviços de concretagem estarão direcionando, num futuro próximo, à compra de um determinado concreto apenas pela especificação do módulo de elasticidade. Esse fato seria a simplificação da tratativa comercial, uma vez que, solicitados concretos pelo *fck*, não estaríamos garantidos quanto ao quesito módulo.

Tal parâmetro é mais difícil de ser atingido do que a resistência à compressão, pois depende de fatores internos e que relacionam as propriedades e interação de seus componentes dentro do concreto.

Com a evolução e desenvolvimento dos concretos atuais, o valor para as resistências continua ainda sendo o item de maior relevância e influência no preço do concreto. Nas décadas passadas, o preço do concreto variava em função da distância entre as usinas e a obra. Atualmente esse parâmetro está em desuso e em muitos casos, específicos das grandes capitais, o concreto ganha uma nova variável, o tempo, que passa a ser mais relevante, pois depende da intensidade e volume do tráfego entre as usinas e as obras.

O mesmo se aplicará à solicitação do módulo de elasticidade que torna esse cálculo ainda mais complexo, porém de extrema importância nos valores finais do produto comercializado. Com isso, os parâmetros de módulo estariam sendo garantidos para um determinado tipo de concreto e não um concreto para se buscar um determinado parâmetro de módulo.

6. ALTERNATIVA PARA MEDIDA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE NA ESTRUTURA

6.1 Princípio teórico

Nas estruturas de concreto armado, a deformação lenta ocorre ao longo de muitos anos. Estudos realizados pelo *ACI*, American Concrete Institute, apontam que deformações em corpos de prova são percebidas mesmo após 30 anos. Porém se o nível de tensões não for alterado ao longo desses anos o incremento de deformação se torna muito pequeno.

O concreto por ser um material visco-elástico apresenta diferentes comportamentos quando carregado. Submetido a tensões que ultrapassam seu limite elástico, deformações residuais irreversíveis permanecerão na estrutura. Com base em experiências realizadas nos Estados Unidos e Europa, as construções que utilizam o concreto estrutural, determinam os valores da fluência do concreto através de uma lei logarítmica, apresentada a seguir:

$$\epsilon(T) = \sigma(i) \cdot [1/E(i) + F(i) \cdot \log(e) \cdot (T+1)]$$

onde:

$\epsilon(T)$ - deformação específica desenvolvida no concreto no instante t .

$\sigma(i)$ - tensão constante desenvolvida no concreto na idade i .

$E(i)$ - módulo de deformação longitudinal instantâneo na idade i .

$F(i)$ - parâmetro da fluência, função da idade i .

T - tempo durante o qual a tensão $\sigma(i)$ é desenvolvida.

O módulo de deformação longitudinal do concreto é obtido em diversas datas (i), levando-se em consideração a fluência do concreto, como função de $E(i)$ e $F(i)$. A teoria desenvolvida segue o método do “*Bureau of Reclamation*”, o qual é baseado no princípio da superposição de efeitos, não somente na fase elástica, mas também, na fase não-linear das deformações considerando o efeito da fluência do material concreto.

Em corpos de prova de concreto ensaiados sob o desenvolvimento da variável tensão normal $\sigma(T)$ com o passar do tempo, é plotada $\sigma(T)$ função de T , ilustrada nos gráficos abaixo:

A figura 6.1.1 apresenta o diagrama de tensões (σ) aplicadas em diversas idades (T) e o correspondente das deformações (ϵ) pelo método das superposições dos efeitos.

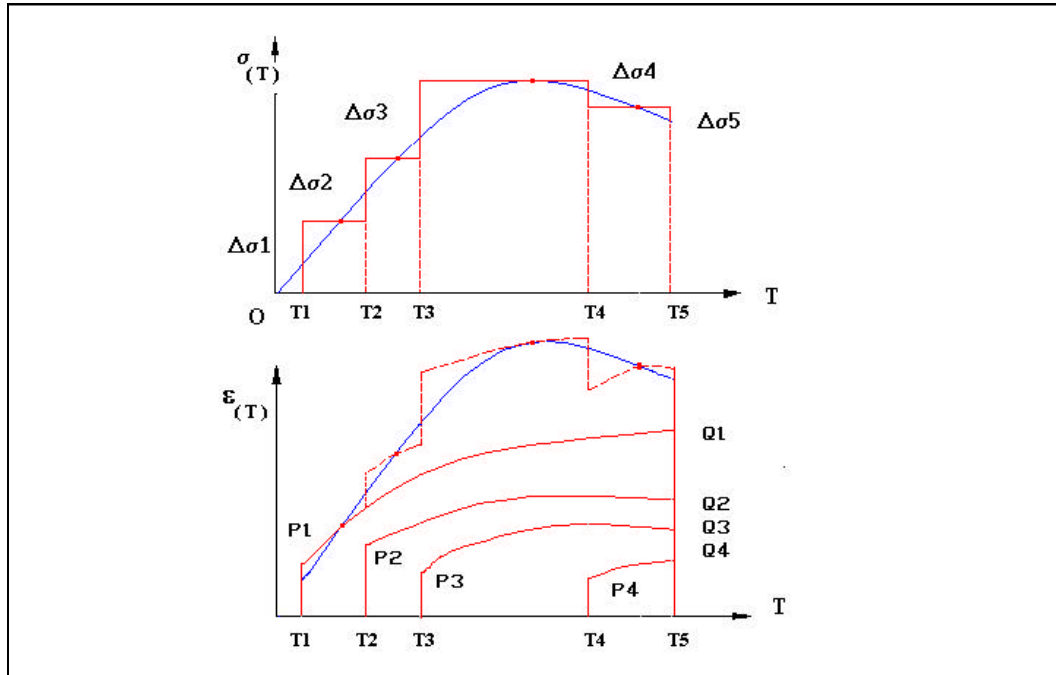


Figura 6.1.1 – Diagramas de tensões e de deformações em diversas idades pelo método de superposição de efeitos.

Fonte: MARECOS, J. (1986)

$$P1T1 = \Delta\sigma_1 / E(T1), P2T2 = \Delta\sigma_2 / E(T2), P2T3 = \Delta\sigma_3 / E(T3), \dots$$

Segundo MARECOS, J. (1986), *apud*. TRINDADE (1990), a curva $\sigma(T)$ é baseada por sucessivos incrementos $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3, \dots$ aplicados nos instantes $T1, T2, T3, \dots$. As parcelas $T1P1Q1, T2P2Q2, T3P3Q3, \dots$ encontradas, representam as deformações específicas por efeito da fluência, onde desenvolveram-se tensões $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3, \dots$

Com base no princípio da superposição de efeitos, as deformações específicas $\epsilon(T)$ no corpo de prova a cada instante T sobre os sucessivos incrementos de tensões são obtidas pela adição das ordenadas das curvas $T1P1Q1, T2P2Q2, T3P3Q3, \dots$

A expressão analítica para os diversos instantes $\epsilon(T)$, é dada pela expressão:

$$\epsilon(T) = \sum_{i=1}^T \Delta\sigma_i \cdot [1/E(\alpha) + F(\alpha) \cdot \log(e) (T_i + 1)]$$

onde:

$T_i = T - T_j$ é o tempo durante o qual é desenvolvida a tensão $\Delta\sigma_i$ e “ α ” é a idade do concreto no instante “ T_i ”.

O valor do módulo de deformação longitudinal é obtido pela relação:

$$E(\alpha) = \sum \Delta\sigma_i / \epsilon(T).$$

6.2 A célula de fluência

A célula de fluência, representada na figura 6.2.1, é composta basicamente por um cilindro metálico de dimensões reduzidas, que possui um orifício circular aberto numa de suas extremidades, local por onde o concreto deverá ser inserido e uma membrana interna que receberá pressão, na outra extremidade. A célula de fluência é posicionada dentro das ferragens e fôrmas da estrutura, cuidadosamente, em locais previamente discutidos com o projetista estrutural e concretada em conjunto com o pavimento que será analisado posteriormente.

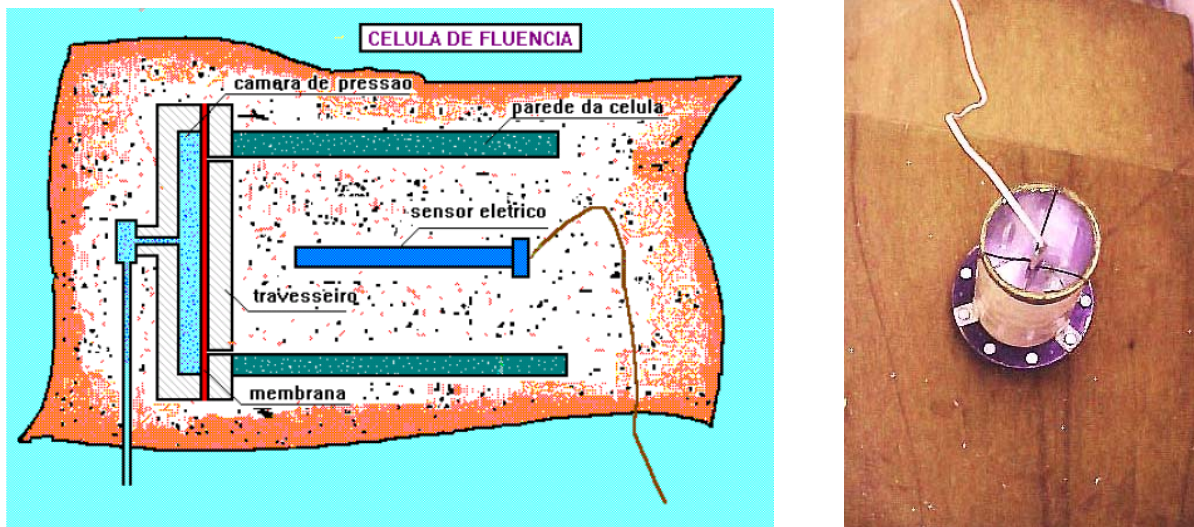


Figura 6.2.1 - Detalhe genérico da célula de fluência e seus componentes

Fonte: MARQUES, G.; TRINDADE, O.A. (1990)

Por meio de um sensor elétrico do tipo “*strain gage*”, devidamente posicionado em seu interior, a célula de fluência quando submetida a tensões provenientes da câmara de pressão, registra as deformações sofridas pelo concreto naquele instante (T).

Geralmente os parâmetros do projeto estrutural, tais como, módulo de elasticidade no instante da desforma, podem ser monitorados e acompanhados por esse sistema.

Para a obtenção do módulo de elasticidade do material concreto na estrutura, o “*strain gage*” é conectado por meio de fios, a um conjunto de equipamentos eletrônicos, tais como, conversor analógico digital, um registrador potenciométrico e um computador, apresentados na figura 6.2.2.

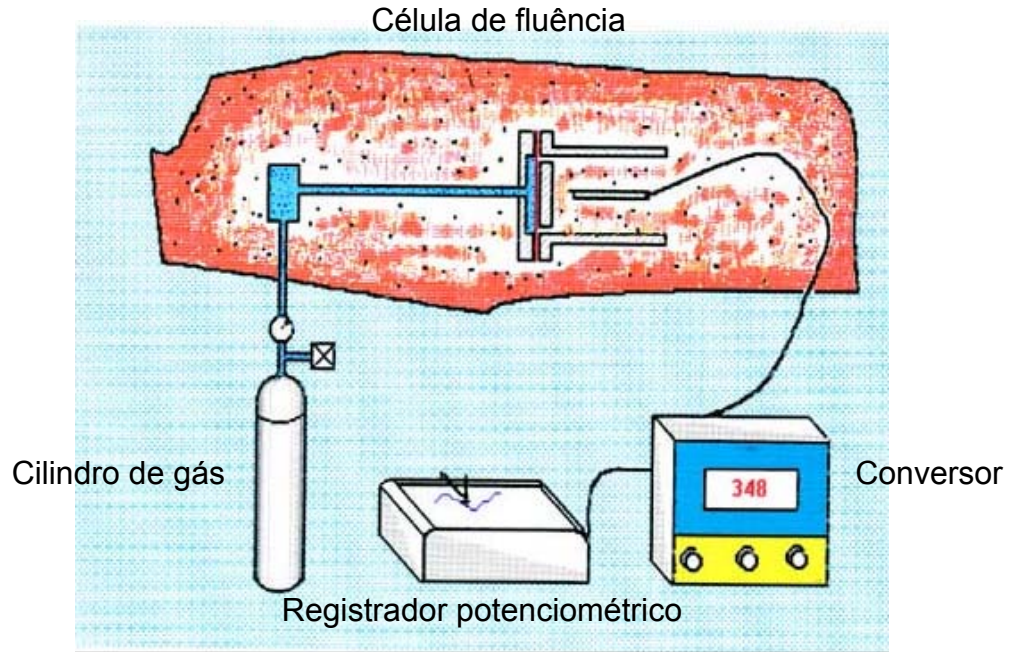


Figura 6.2.2 – Detalhe genérico dos dispositivos utilizados na medição do módulo de elasticidade na estrutura de concreto.

Fonte: MARQUES, G.; TRINDADE, O.A. (1990)

Em conjunto com a célula de fluência outro dispositivo de mesmas dimensões, denominado compensador, também será concretado na estrutura. Esse elemento permite zerar as deformações iniciais sofridas pelo material concreto, relativas à secagem, cura, e retração, fazendo com que a célula registre apenas as deformações correspondentes à carga aplicada.

As deformações no concreto, captadas pelo sensor elétrico da célula de fluência e do compensador, são processadas pela resistência elétrica e a diferença de potencial elétrico, calculado através da “*ponte de wheatstone*”, geradas no registrador potenciométrico.

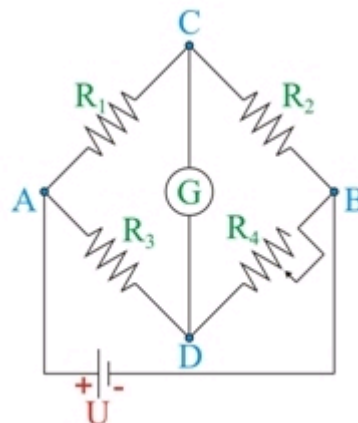


Figura 6.2.3 – Detalhe esquemático da “*ponte de wheatstone*” para conversão dos valores e determinação das deformações no “*strain gage*”.

R1 – Célula de fluência.

R2 – Compensador.

6.3 A medida do módulo de elasticidade no laboratório

O conhecimento dos materiais e suas propriedades, bem como, o desenvolvimento de todo o processo inicia-se no laboratório da usina de concreto. Dos parâmetros fornecidos pelo projetista estrutural, desenvolve-se o estudo do traço de concreto e a partir daí seus respectivos ensaios.

Com a definição do traço e seus materiais constituintes, cimento, areia, agregados e aditivos, é feita a inserção da célula de fluência e do compensador, em uma caixa de madeira que será concretada com o mesmo concreto que atenderá a obra futuramente.

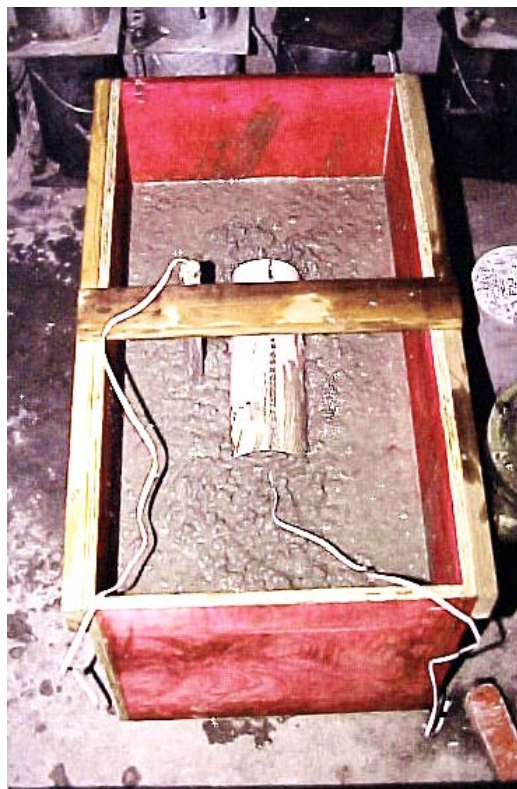


Figura 6.3.1 – Instalação e concretagem da célula de fluência no laboratório da usina de concreto para conhecimento do comportamento do material

Fonte: M&T Engenharia (1990)

Segundo TRINDADE (1990), as vantagens da célula de fluência imersa no concreto, em relação ao corpo de prova moldado são as condições de cura e retração serem idênticas às da estrutura, garantindo maior confiabilidade ao resultado gerado.

Após determinadas idades, são conectados aos dispositivos concretados na caixa, os equipamentos de medição e valores para o módulo de elasticidade são obtidos instantaneamente a partir da célula de fluência. A figura 6.3.2 ilustra o equipamento utilizado no laboratório da usina.



Figura 6.3.2 – Equipamento utilizado na obtenção do módulo de elasticidade no laboratório da usina.

Fonte: M&T Engenharia (1990)

A tabela 6.3.1 apresenta os resultados obtidos aos 3, 7 e 28 dias para o concreto ensaiado.

Ensaio	Idade (dias)	f_u (Mpa)	E (Gpa)
CP1	3	28,4	24,8
CP2	3	36,7	24,9
CP1	7	37,7	28,0
CP2	7	36,1	28,6
CP1	28	44,5	29,8
CP2	28	42,9	31,0

Tabela 6.3.1 – Resultados obtidos do material desenvolvido no laboratório da usina

DJANIKIAN e TRINDADE (2001), em estudos sobre a evolução das resistências características do concreto, em conjunto com os anseios de alguns projetistas estruturais parceiros, definiram uma família de concretos apresentadas na tabela 6.3.2, seguinte.

Módulo de Elasticidade a 28 dias

Concreto	E=30GPa	E= 32GPa	E= 34GPa	E= 36GPa
fc28 (MPa)	43,3	49,2	57,2	71,6
fck (MPa)	30	40	50	60
E (0,3 fc)	31,6	34,4	35,1	36,3
E (0,4 fc)	30,4	33,2	34,7	35,9

onde fc28 = resistência à compressão aos 28 dias
 fck = resistência característica à compressão.
 E = módulo de elasticidade a 30% e 40% de fc
 fc = resistência última de ruptura dos corpos de prova.

Tabela 6.3.2 – Estudo de concreto com variação de resistência de 30 a 60 Mpa aos 28 dias

Fonte: DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. (2001)

Com os componentes do concreto previamente definidos e aprovados no laboratório da usina, os resultados aferidos nos ensaios de ruptura à compressão e a medida do módulo de elasticidade atendida em diversas idades, cumprindo-se as especificações técnicas de projeto, o passo seguinte é repetir todo o processo diretamente na estrutura da obra.

7. ESTUDO DE CASO – OBRA HOTEL IBIS CONGONHAS

7.1 A medida do módulo de elasticidade na estrutura

O estudo de caso, objeto desse trabalho, foi desenvolver e assegurar para o cliente construtor que toda a cadeia produtiva envolvida no processo da estrutura, trabalhasse de forma correta, unificada e sem desvios no decorrer do percurso.

A concreteira foi contratada, com base em sua experiência profissional, qualificação técnica e homologada para o projeto, conforme especificações advindas do projetista estrutural, atestadas nos materiais previamente ensaiados em seu laboratório.

Consequentemente, com esses parâmetros conhecidos no laboratório e com a manutenção dos mesmos componentes do concreto, tais como, cimento, agregados e aditivos durante a execução da obra, foi instalada a célula de fluência e o compensador, conforme figura 7.1.1, em local determinado pelo projetista estrutural, a fim de se medir o módulo de elasticidade do material concreto nas condições da obra.

As especificações de projeto perseguidas na obra eram:

$f_{ck}=30\text{Mpa}$ aos 28 dias; $E= 26\text{Gpa}$ para tensão de 8Mpa



Figura 7.1.1 – Instalação e concretagem da célula de fluência e do compensador na estrutura da obra em local determinado pelo projetista estrutural

Fonte: DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. (2001)

Por intermédio da pressão de ar equivalente a 20% da tensão de ruptura, conhecida previamente no laboratório, e aplicada na célula de fluência instalada na estrutura, é obtida uma deformação no “*strain gage*” que permite avaliar o valor do módulo de elasticidade esperado. A figura 7.1.2 apresenta o instante do ensaio na obra.



Figura 7.1.2 – Obtenção do módulo de elasticidade do concreto por meio da célula de fluência instalada na estrutura

Fonte: DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. (2001)

O resultado da medida é uma curva em que aparece a deformação obtida pela aplicação da pressão constante de 20% da tensão de ruptura, durante um intervalo de tempo de 5 minutos, como se observa na figura 7.1.3.

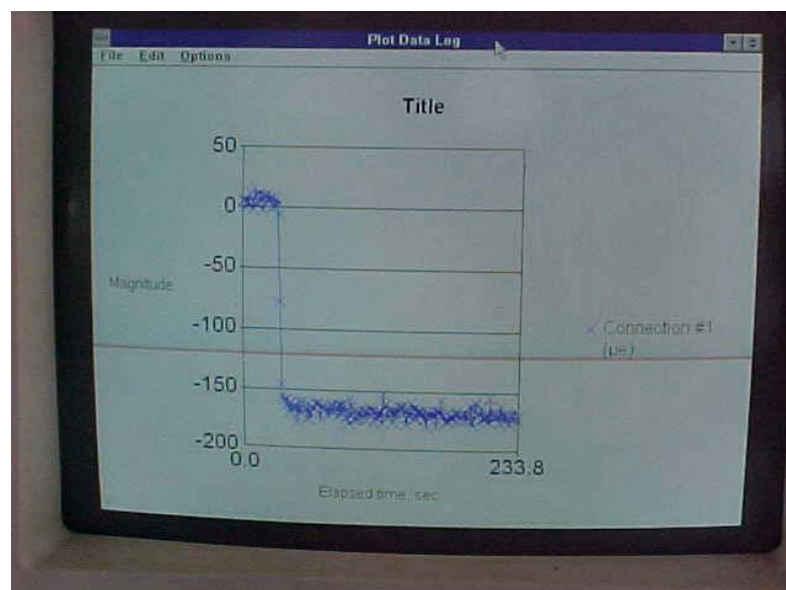


Figura 7.1.3 – Deformação obtida no concreto com aplicação da pressão de ar na célula de fluência no instante da desforma.

Fonte: DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. (2001)

Na obra objeto desse estudo, o projetista estrutural, havia especificado o módulo de elasticidade mínimo em 26 GPa, para uma tensão de 8,00 MPa, aos 4 dias de idade, afim de liberar o início dos serviços de protensão das lajes.

A partir dos ensaios realizados na própria estrutura por intermédio da célula de fluência, e aplicando-se o método das superposições dos efeitos, foram obtidos os seguintes resultados, indicados abaixo, na tabela 7.1.1.

Leitura	Tensão (MPa)	E (GPa)
0,1fc	3,83	35,9
	7,00	35,4
0,2fc	7,66	35,4
	8,00	35,3
0,3fc	9,00	35,2
	11,49	35,0
0,4fc	15,32	34,8

$$\text{Função} \rightarrow E = - 0,0001 \cdot f_i^3 + 0,0084 \cdot f_i^2 - 0,2223 \cdot f_i + 36,23$$

Tabela 7.1.1 – Resultados obtidos na célula de fluência da estrutura interpolados pelo método das superposições de efeitos “*Bureau of Reclamation*”.

Fonte: DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. (2001)

Através da instrumentação do andar tipo, pôde-se concluir que os valores obtidos na obra encontram-se em condições de segurança estrutural, e em conformidade com as recomendações da NBR 6118.

A figura 7.1.4 mostra uma vista do pavimento sem os escoramentos, preparado para receber as vedações.



Figura 7.1.4 – Vista interna do pavimento da obra sem os escoramentos

Fonte: DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. (2001)

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, muitas mudanças foram incorporadas à tradicional maneira de se construir estruturas de concreto armado. Considerando-se a evolução do material concreto, as estruturas ganharam em flexibilidade e, suas tipologias têm possibilitado formatos arquitetônicos cada vez mais arrojados.

Os edifícios, por sua vez, estão maiores, mais altos, esbeltos com suas concepções beneficiando maiores vãos, menos pilares e lajes com espessuras reduzidas.

O processo construtivo e as técnicas de controle também mudaram, exigindo dos construtores um acompanhamento da execução mais eficiente e em tempo real.

Infelizmente, na engenharia civil, a velocidade na execução dos processos pode causar transtornos indesejáveis, com conseqüências, muitas vezes, desastrosas para todos os envolvidos no processo. Acelerar procedimentos, encurtar atividades, economizar na seqüência lógica dos serviços, tem se tornado o maior objetivo da construção civil e a racionalização, em muitos casos, estaria funcionando de forma inversa.

As estruturas, por exemplo, precisam estar escoradas adequadamente para que as reações do cimento no concreto recém lançado possam se desenvolver ao longo do tempo sem que haja qualquer interferência externa e cuidados com carregamentos precoces nas lajes cada vez mais evitados. A solução estaria, no entanto, no caminho inverso à racionalização? Menos lajes deveriam ser concretadas no mesmo mês e o material concreto, que na maioria dos casos é bombeado a fim de facilitar e a aumentar a velocidade do processo, ser substituído por um concreto de consistência mais seca, menos argamassado, com menor relação água-cimento, que beneficie maiores valores de módulo de elasticidade para a estrutura?

Cada caso requer um estudo prévio e aprofundado das prováveis conseqüências que estariam atreladas às soluções adotadas. Conhecendo-se essas variáveis o uso da racionalização dos processos ganha força e estaria beneficiando a cadeia produtiva da estrutura. A inter-relação entre os envolvidos no processo torna o controle eficaz minimizando custos desnecessários com retrabalho.

Com a introdução do sistema de controle do módulo de elasticidade para o concreto por meio da célula de fluência instalada na estrutura, os resultados estariam sendo obtidos diretamente nos componentes estruturais, e nas condições originais do concreto e da obra. Construtores e clientes poderão acompanhar a medição aferindo em tempo real os resultados obtidos diretamente na tela do computador.

Dessa forma os valores estariam sendo atestados e confirmados no local, uma vez que, foram previamente ensaiados na usina. Com isso, economias na compra ou locação de escoramento, re-escoramento de diversos andares, e também relacionadas ao tempo de desforma poderão ser geradas ao sistema de forma real e atividades subseqüentes ao concreto, como por exemplo, vedações e instalações, serem iniciadas antecipadamente.

9. ESTUDOS FUTUROS

Com o valor do módulo de elasticidade confirmado na estrutura pela célula de fluência, pôde-se atestar que o material concreto está em conformidade com o especificado em projeto.

Porém, outros pontos de extrema importância relacionados ao comportamento estrutural requerem alguns cuidados necessários. A interface estrutura-alvenaria é afetada diretamente pelas deformações sofridas pelas vigas e os revestimentos, por sua vez, pela movimentação dos panos de lajes. Muitas patologias ao longo desses anos puderam ser constatadas e poucos estudos apontam soluções efetivamente eficientes.

Tais problemas estão diretamente relacionados ao processo de execução das estruturas de concreto e os cuidados a serem adotados, deverão estar previstos antecipadamente em manuais de procedimento e controle, e fazerem parte do contexto construtivo das empresas. O tipo de concreto a ser utilizado (mais ou menos argamassado), o sistema de escoramento e re-escoramento, o tipo de cura empregado, e o tempo para a desforma, são alguns cuidados que se fazem necessários dentro da etapa de execução.

Para uma análise mais abrangente, cada caso deverá ser verificado individualmente e fatores que relacionam o comportamento estrutural, também, poderão ser controlados diretamente na estrutura.

Na partícula crítica, local onde ocorrerão as maiores tensões, será instalada uma roseta apresentada na figura 9.1, cujas coordenadas para sua instalação serão fornecidas pelo projetista estrutural.



Figura 9.1 – Roseta instalada na partícula crítica (a) e posterior concretagem do dispositivo (b).

Fonte: 3D Engenharia / M&T

A roseta é um dispositivo de medição composto por três sensores do tipo “*strain gage*”, dispostos em três direções diferentes, para conhecimento do comportamento estrutural na partícula crítica (figura 9.2), que poderá ocorrer por ocasião do re-escoramento das lajes ou pelos efeitos dinâmicos provenientes da retirada das fôrmas e escoramentos.

Com os valores das deformações obtidos na roseta, em conjunto com o módulo de elasticidade do material concreto registrado na célula de fluência, deduz-se as tensões aplicadas na partícula crítica da estrutura, que serão comparadas ao modelo matemático.

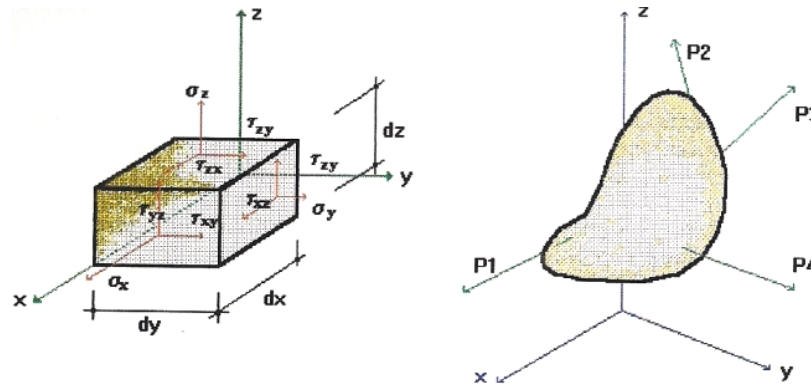


Figura 9.2 – Detalhe genérico da partícula crítica sob o estado triaxial de tensões

Fonte: 3D Engenharia / M&T

Os resultados capturados nesses instantes são dispostos por meio de um histograma que ilustra as deformações imediatas sofridas pela estrutura naquela data nas três grades de direções, conforme ilustrado na figura 9.3.

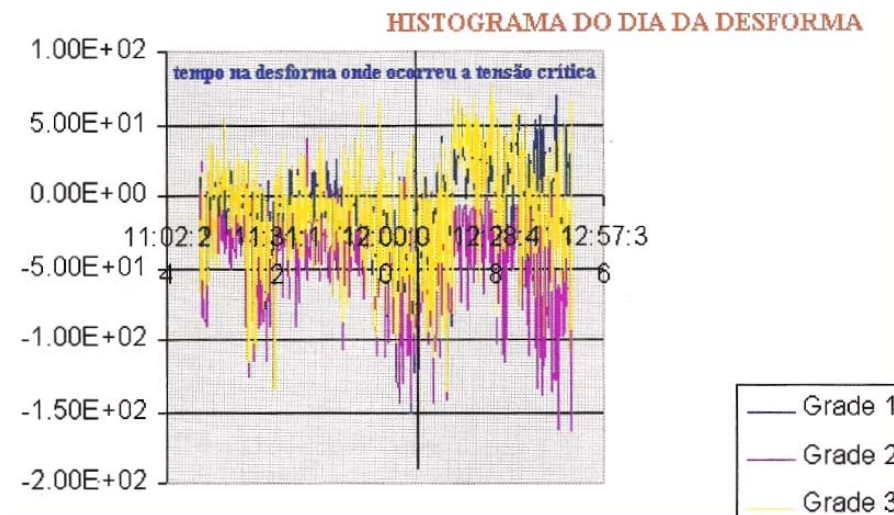


Figura 9.3 – Histograma de efeitos dinâmicos nos sensores da roseta na retirada das fôrmas

Fonte: 3D Engenharia / M&T

Verificadas as tensões na partícula crítica, outro ponto que requer controle de deformações é a posição da estrutura de maior deslocamento ou deflexão (flecha). Nesse local, previamente indicado pelo projetista estrutural, será instalado um deflectômetro mecânico que registrará as flechas pela ocasião do re-escoramento e pela retirada total do cimbramento ilustrados nas figuras 9.4 e 9.5, a seguir.

O principal objetivo é garantir que os parâmetros do projeto estrutural estejam sendo respeitados e que os efeitos de deformação permaneçam sob controle dentro dos limites pré-estabelecidos no modelo de cálculo.



Figura 9.4 – Foto do deflectômetro mecânico instalado para leitura da flecha no ponto de maior deslocamento.

Fonte: 3D Engenharia / M&T

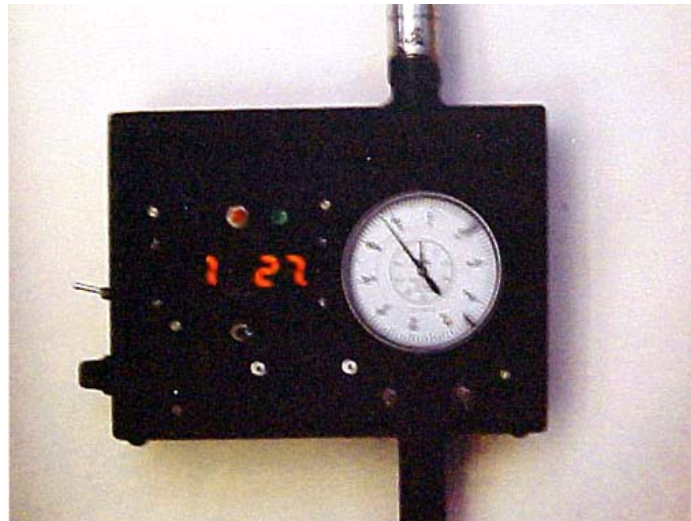


Figura 9.5 – Registro da flecha no instante da desforma.

Fonte: 3D Engenharia / M&T

Outra ferramenta disponível que incrementa os estudos que relacionam as deformações nas estruturas de concreto, é a análise do comportamento estrutural através de modelos físicos reduzidos. Esse sistema passa a ser bastante usual, não somente em obras de grande porte, barragens, pontes, e viadutos, como também, em estruturas reticuladas de edifícios, e estruturas especiais. (figura 9.6)

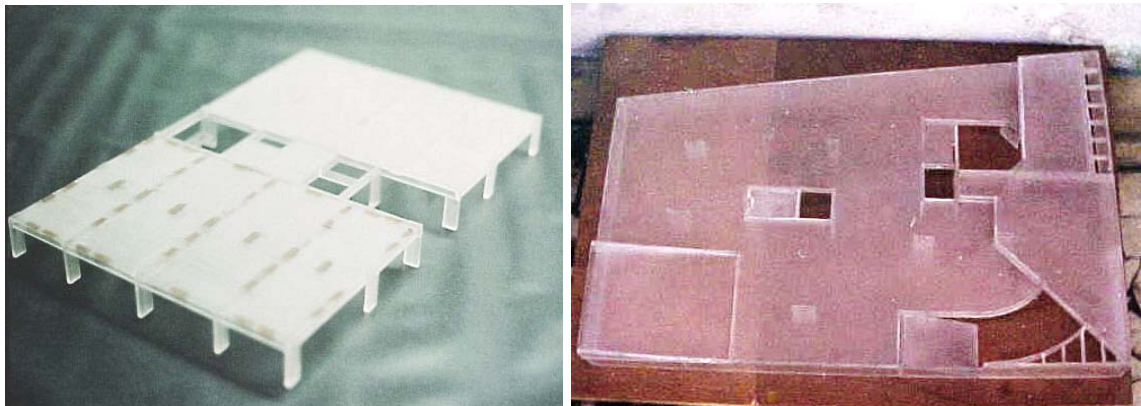


Figura 9.6 – Exemplo de modelos físicos reduzidos em acrílico para panos de laje em edifícios.

Fonte: 3D Engenharia / M&T

Para análise dos modelos reduzidos, é necessário um conjunto de equipamentos mecânicos, elétricos e eletrônicos denominado C.V.E.E – Calculador verificador experimental estrutural.

A figura 9.7 apresenta um modelo físico reduzido de um pavimento tipo de uma estrutura reticulada recebendo carregamento em uma mesa de ensaio.

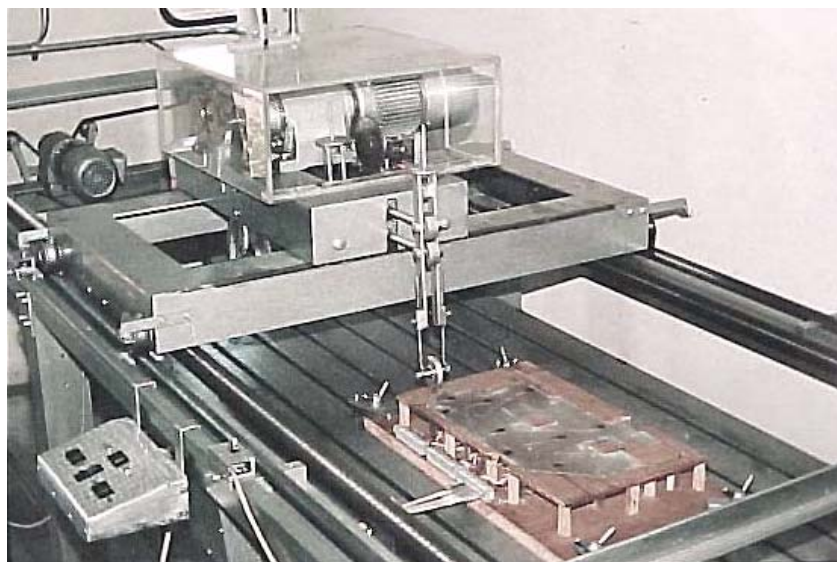


Figura 9.7 - Ensaio de carregamento para análise do comportamento estrutural no modelo físico reduzido em laboratório.

Fonte: 3D Engenharia / M&T

No cálculo analítico dos esforços internos de uma estrutura, as premissas teóricas de resistência dos materiais e da teoria da elasticidade, tornam-se não muito precisas, pois analisam a estrutura de forma simplificada.

A eficácia da análise nos modelos reduzidos para obtenção dos valores dos esforços e deformações elimina as deficiências dos métodos analíticos. Isto ocorre quando se pretende fazer uma previsão mais real do comportamento de uma estrutura fora do domínio elástico, pois a mesma estará sendo analisada trabalhando, em seu conjunto, como um todo.

O modelo físico é construído a partir de certa escala do protótipo, em material acrílico, por possuir características visco-elásticas semelhantes ao concreto, instrumentado por uma família de sensores roseta de três direções, adequadamente posicionados, onde permitirá obter as posições da partícula crítica, da partícula de maior deflexão, bem como, outras análises e comportamentos que se façam necessários. (figura 9.8 e 9.9)

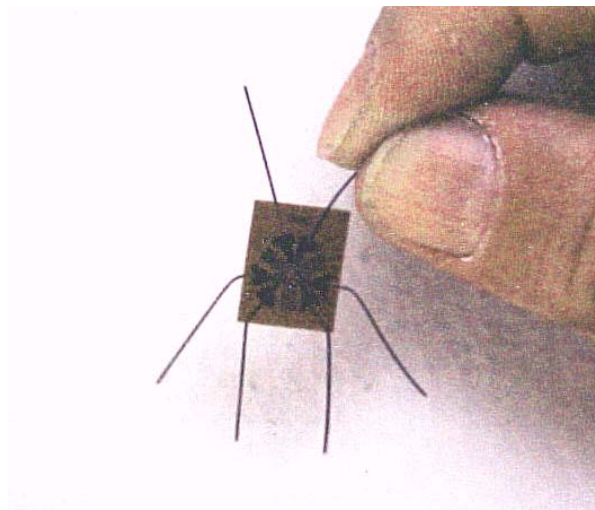


Figura 9.8 – Sensor roseta de três direções para análise do modelo reduzido.

Fonte: 3D Engenharia / M&T

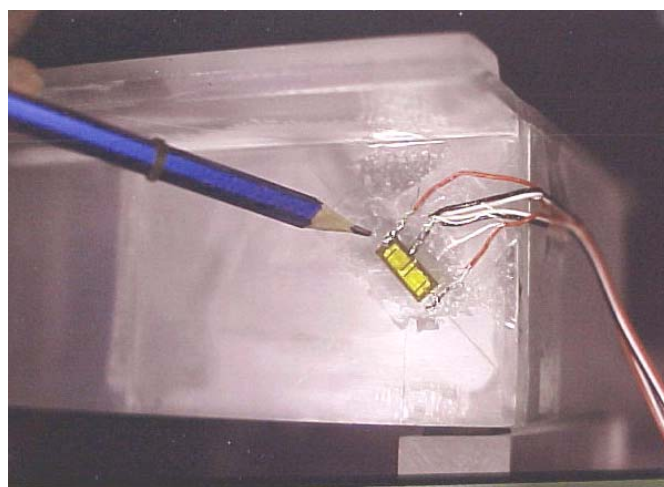


Figura 9.9 – Sensor instalado em uma viga de acrílico para verificação dos esforços de cisalhamento próximos ao apoio.

Fonte: 3D Engenharia / M&T

O processo de cálculo utilizado para os modelos reduzidos é o da medida das elongações das fibras das peças da estrutura para correlação com o cálculo analítico do concreto.

O comportamento da estrutura também pode ser estudado por um modelo matemático analítico criado por elementos finitos. O resultado desse estudo é representado na figura 9.10, onde as tensões desenvolvidas pela ação dos carregamentos poderão comprovar as hipóteses usadas pelo projetista estrutural e comparadas com o modelo reduzido.

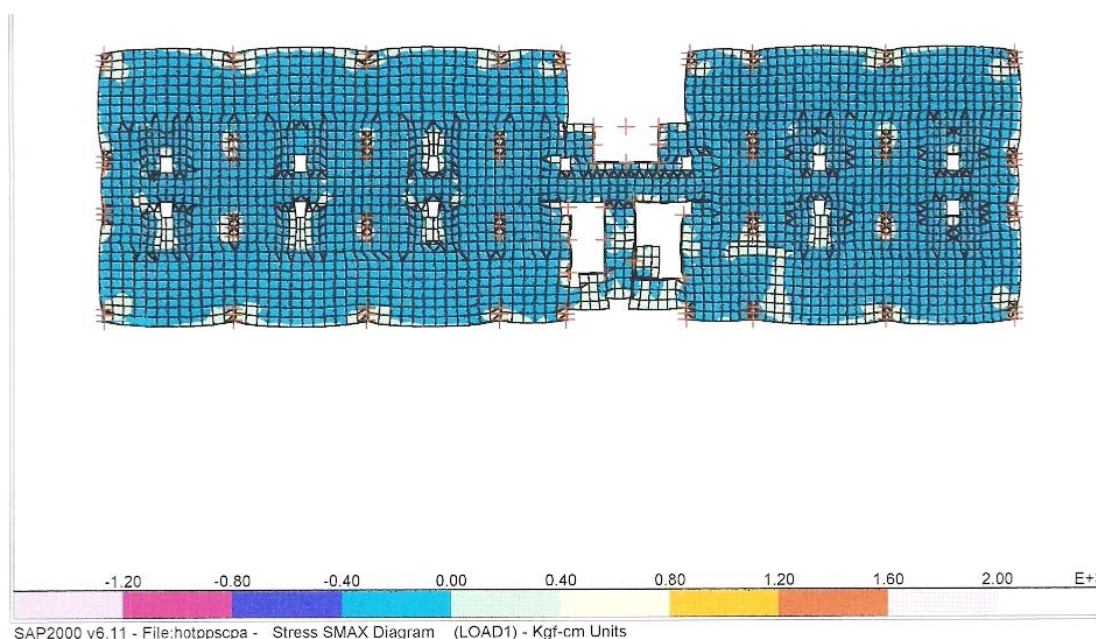


Figura 9.10 – Diagrama das tensões a partir do modelo analítico criado por elementos finitos

Fonte: 3D Engenharia / M&T

Com as novas tecnologias apresentadas por meio dos resultados fornecidos a partir da estrutura, as deformações computadas passarão a fazer parte de um conjunto de registros que proporcionarão subsídios importantes para as novas construções. O avanço das técnicas construtivas estará, cada vez mais, acessível minimizando patologias que relacionem diferentes subsistemas, aprimorando conhecimento, agregando valor, melhorando a segurança e o conforto para as construções em geral.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITCIN, P.C.; *Concreto de Alto Desempenho*. Tradução de Geraldo G. Serra – PINI, 2000.

AITCIN, P.C.; MEHTA, P.K. – *Effect of coarse – Aggregate characteristics on mechanical properties on high strength concrete*. ACI Materials Journal, v.87, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento* – Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão - deformação*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 8522: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro, 2008.

_____. *NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2006.

ARNDT, J.A.; SOUZA, J.; BIANCHINI, M. *Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto*, Anais de 49º. Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves – RS, 2007.

BATTAGIN, I.L.S. *Módulo de elasticidade do concreto: como analisar e especificar*, Disponível em < www.abece.com.br/web/download/pdf/Eventos_EM_3_2007.pdf >. Acesso em Março, 2010.

CAMACHO, J.S. *Apostila do Curso de concreto armado (NBR 6118/2003): Introdução*, UNESP, 2006.

CUPERTINO, M.A.L.; CASTRO A.; INÁCIO, J.J.; ANDRADE, M.A.S. *Avaliação de fatores de ensaio que interferem nos resultados de módulo de elasticidade do concreto*, Anais de 49º. Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves – RS, 2007.

CUPERTINO, M.A.L.; INÁCIO, J.J.; PEREIRA, A.C.; FARIAS, L.A.; SILVA, A.R.; ANDRADE, M.A.S.; OLIVEIRA, N.M. *Análise da influência da dimensão básica do corpo de prova no módulo de elasticidade*, 50º. Congresso Brasileiro do Concreto, 2008.

DJANIKIAN, J.G. – *Questão de Elasticidade* – Entrevista publicada na revista Pini, no. 2701, p.10-13. São Paulo, 1999.

DJANIKIAN, J.G.; TRINDADE, O.A. *Medida do módulo de elasticidade do concreto “in situ”*, 43º. Congresso Brasileiro do Concreto, 2001.

HELENE, P.R.L. *Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Relatório Técnico no. 10.122 à Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 1998.

HERVÉ NETO, EGYDIO. – *A nova engenharia do concreto*, Disponível em <http://www.creape.org.br/c/document_library/get_file?p_l_id=13273&folderId=15535&name=DLFE-601.pdf>. Acesso em Março, 2010.

JOES, K. *Calculation of stress from strain in concrete*, Bureau of Reclamation - Tech. Mem. 653 - 1955.

KUPERMAN, S. *Considerações sobre Fluência de Concretos*, Entrevista publicada na revista Técnica, Disponível em < <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/artigo59014-1.asp> > Agosto, 2007.

MARECOS, J. *The 40 Years of LNEC experience on observation and testing of bridges and special structures*, LNEC - RILEM, Lisbon, 1986.

MARQUES, G.; TRINDADE, O.A. *Concreto: Desenvolvimento de célula de fluência para medida de módulo de deformação longitudinal*. Relatório Interno. M&T Engenharia. São Paulo, 1990.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*: Pini, 2008.

MELO NETO, A.A.; HELENE, P.R.L. *Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos*, 44º. Congresso Brasileiro do Concreto, 2002.

MEYERS, J.J. *How to achieve a higher modulus of elasticity* – Publication – HPC Bridge Views, FHWA Sponsored, NCBC Co-Sponsored Newsletter, Issue no. 5, September/October, 1999.

MONTIJA, F.C. *Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

NEVILLE, A.M.; *Propriedades do concreto*. 2ª. edição. São Paulo: Pini, 1997.

PEREIRA NETO, P.M. *Efeito do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microssilica*. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1994.

SANTOS, C.B.; GAMBALE, E.A.; ANDRADE, M.A.S. *Modelos de predição do módulo de elasticidade do concreto*, 48º. Congresso Brasileiro do Concreto, 2006.

VASCONCELOS, A.C.; GIAMMUSSO, S.E. *O misterioso módulo de elasticidade*, 40º. Congresso Brasileiro do Concreto, Rio de Janeiro, 1998.

ZAMARION, J. *Variável concreta*, Entrevista publicada na revista Técne, Disponível em < <http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/artigo59013-4.asp> > Acesso em Março, 2010.