



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DESENVOLVIMENTO DE UM COMPRESSÔMETRO PARA
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO
CONCRETO

MARA CRISTINA DE SOUSA CARDOSO

Marabá - PA
2013

MARA CRISTINA DE SOUSA CARDOSO

DESENVOLVIMENTO DE UM COMPRESSÔMETRO PARA
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO
CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Materiais da Universidade Federal do
Pará – UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Márcio Corrêa de
Carvalho.

Marabá - PA
2013

Cardoso, Mara Cristina de Sousa

Desenvolvimento de um compressômetro para determinação do módulo de elasticidade do concreto / Mara Cristina de Sousa Cardoso ; orientador, Márcio Corrêa de Carvalho. — 2013.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá, 2013.

1. Concreto - Propriedades mecânicas. 2. Resistência de materiais. 3. Elasticidade. I. Carvalho, Márcio Corrêa de, orient. II. Título.

MARA CRISTINA DE SOUSA CARDOSO

DESENVOLVIMENTO DE UM COMPRESSÔMETRO PARA
DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO
CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Materiais da Universidade Federal do
Pará – UFPA, em cumprimento às
exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Márcio Corrêa de
Carvalho.

Data de aprovação: ____/____/____

Conceito: _____

Bancada Examinadora:

Prof. M.Sc. Márcio Corrêa de Carvalho
ORIENTADOR – UFPA

Prof. Dr. Luiz Moreira Gomes
EXAMINADOR – UFPA

Prof. M.Sc. Simone Patricia Aranha da Paz.
EXAMINADORA – UFPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito a Deus por ter me concedido o dom da vida, por sempre estar ao meu lado e me ajudar nos momentos mais difíceis da minha.

A minha mãe por ensinar os verdadeiros valores da vida e os caminhos certos a seguirem, ao seu imenso amor que sempre me ajudou a enfrentar as dificuldades da vida.

Ao meu pai por estar sempre ao meu lado me apoiando em todas as minhas decisões e ao seu amor que também me ajudou a enfrentar as dificuldades da vida.

Ao meu irmão Marcos Antônio de Sousa Cardoso que sempre conversou comigo nos momentos difíceis me confortando com suas palavras sábias e ao meu irmão Marcelo de Sousa Cardoso pelo seu apoio.

A minha amiga Viviane e colega de classe que sempre teve ao meu lado nos momentos difíceis do nosso curso como as provas, os trabalhos e pelas suas palavras de conforto nos momentos críticos da minha vida por estar longe da minha família.

Ao meu noivo Hítalo Lukas Silva Alves pelo seu imenso amor e compreensão.

Ao meu orientador Márcio Corrêa de Carvalho, por acreditar em mim oferecendo uma bolsa de iniciação científica e seu apoio.

À Universidade Federal do Pará, pela formação em Engenharia de Materiais.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditaram em mim, principalmente aos meus pais Joana de Sousa Cardoso e Floriano de Rocha Cardoso que foram os pilares para minha formação, pois eles e Deus foram as minhas fontes de energia para concluir mais uma jornada importantíssima da minha vida.

RESUMO

A determinação das propriedades mecânicas do concreto é de suma importância para que seja dimensionada uma estrutura de concreto. Assim, a maioria dos projetos estruturais são calculados com base na resistência à compressão, sendo esta determinada através de ensaio de compressão. Entretanto para o cálculo estrutural se aproximar de uma maneira mais realista do comportamento do material é de grande importância o conhecimento das propriedades da deformação do material a ser utilizado, não somente a resistência à compressão tem-se que conhecer com precisão o módulo de elasticidade. A medida de deformação é o fator mais importante para determinar o módulo de elasticidade e então foi desenvolvido e construído um compressômetro para medir a deformação de um corpo de prova cilíndrico de concreto durante o ensaio de compressão. Durante o trabalho foram realizadas as seguintes etapas: modelar tridimensionalmente o compressômetro em software CAD-3D (Desenho Tridimensional Assistido por Computador); fabricação; execução de ensaios de compressão de corpos de prova de concreto auxiliado do compressômetro e análises dos resultados para verificar se o aparelho construído estará apto para ser aprovado. Os resultados obtidos apresentaram uma boa correlação com a fórmula empírica da NB1 e sendo assim o compressômetro foi aprovado.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas. Ensaio de compressão. Compressômetro. Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

The determination of the mechanical properties of the concrete is of utmost importance to be scaled a concrete structure. Thus, most of the structural designs are calculated based on compressive strength, which is determined by compression tests, but for calculating structural approach in a more realistic behavior of the material is of great importance to study the deformation properties of the material to be used, not only the compressive strength, but also to know the exact modulus of elasticity. The measure of deformation is the most important factor to determine the elastic modulus and then it was designed and constructed a compressômetro for measuring the deformation of a cylindrical specimen of concrete during the compression test. During the work was performed the following steps: three-dimensional modeling software in the compressômetro-3D CAD (Design Three Dimensional Computer Aided); manufacture; performing compression tests of specimens of concrete aided compressômetro and analyzes the results to see if the device is able to be constructed approved. The results showed a good correlation with the empirical formula of NB1 and thus the compressômetro was approved.

Keywords: Mechanical properties. Compression test. Compressômetro. Modulus of elasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sequência de obtenção do concreto	17
Figura 2 – Gráfico tensão X deformação	25
Figura 3 – Representação do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade inicial (Eci)	26
Figura 4 – Instrumentos para medição da deformação: (a) dispositivos compressômetros; (b) compressômetro-expansômetro; (c) relógio comparador; (d) compressômetro com 2 relógios comparadores; (e) compressômetro com 1 relógio comparador	28
Figura 5 – Detalhes do dispositivo compressômetro	29
Figura 6 – Fluxograma das etapas da metodologia do projeto	31
Figura 7 – Modelo do compressômetro com o corpo de prova	32
Figura 8 – Protótipo construído	32
Figura 9 – Corpos de prova nos moldes	33
Figura 10 – Tanques de armazenamento	33
Figura 11 – Ensaio de compressão	34
Figura 12 – Média Aritmética dos módulos de elasticidade	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processo de adensamento.....	23
Tabela 2 – Número de golpes no adensamento manual.....	23
Tabela 3 – Módulo de Elasticidade (Eci) de CP's do Lote I com fck 30 MPa.	36
Tabela 4 – Módulo de Elasticidade (Eci) de CP's do Lote II com fck 30 MPa.	36
Tabela 5 – Módulo de Elasticidade (Eci) de CP's do Lote III com fck 30 MPa.	36
Tabela 6 – Módulo de Elasticidade (Eci) de CP's do Lote IV com fck 40 MPa.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
CP's	Corpos de prova
CAD – 3D	Design Three Dimensional Computer Aided
Eci	Módulo de elasticidade inicial
F	Carga aplicada
Fc	Resistência à compressão
Fck	Resistência característica
Fckest	Resistência característica à compressão estimada
GPa	Gigapascal
MPa	Megapascal
A_0	Área da seção
ε	Deformação
ε_a	Deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão menor
ε_b	Deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior
l_0	Comprimento original
l_i	Comprimento instantâneo
Δl	Alongamento da deformação
σ	Tensão de engenharia
σ_a	Tensão menor em megapascals
σ_b	Tensão maior em megapascals
\bar{x}	Média aritmética
δ	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	CONCRETO	15
3.2	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	15
3.3	CORRELAÇÃO COM AS PROPRIEDADES DO CONCRETO.....	18
3.3.1	Resistências mecânicas	18
3.3.2	Fragilidade.....	18
3.3.3	Forma dos grãos.....	19
3.4	ENSAIO DE COMPRESSÃO	20
3.5	AS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	21
3.5.1	Resistência à compressão do concreto	21
3.5.2	Módulo de elasticidade	24
3.6	REVISÃO DA NBR 6118 (NB 1) – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO - PROCEDIMENTO	27
3.7	ACEITAÇÃO DEFINITIVA	27
3.8	COMPRESSÔMETRO.....	28
4	METODOLOGIA	31
4.1	PROJETO E FABRICAÇÃO DO COMPRESSÔMETRO	31
4.2	MOLDAGEM E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA	32
4.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO.....	34
4.3.1	Execução do ensaio de compressão e determinação do módulo de elasticidade ..	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	39
6.1	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	39
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos produtos mais consumidos no mundo, perdendo apenas para a água. Este material não é tão duro nem tão resistente quanto o aço e, mesmo assim, é mais usado na construção civil devido excelente resistência a água (usado em barragens, revestimentos de canais, estacas, fundações, lajes, vigas, muros, etc.); fácil manuseio, sendo adequado a uma variedade de formas e tamanhos; baixo custo e fácil disponibilidade do material para obras pois cimento, agregados e água são relativamente baratos e abundantes no mercado) [1].

A construção civil em Marabá, município do sudeste do Estado do Pará, está crescendo em virtude do crédito farto, obras do programa Minha Casa minha Vida, a chegada de grandes lançamentos imobiliários e o primeiro grande empreendimento no setor de shopping centers, o Shopping Center Pátio Marabá. Conseqüentemente aumentou o consumo de concreto. Em grandes obras são indispensáveis realizar ensaios de compressão no concreto para determinar as propriedades mecânicas mais importantes, que são resistência à compressão e módulo de elasticidade, porém no controle de qualidade dessas obras determinam-se geralmente apenas a resistência à compressão. A construção do Shopping Center Pátio Marabá por ser uma obra de grande porte exigiu a determinação do módulo de elasticidade dos concretos pré-moldado e moldado in-loco, por determinação do engenheiro calculista, mas devido às dificuldades de adquirir um dispositivo para medir essa propriedade foi desenvolvido e construído um compressômetro pela Faculdade de Engenharia de Materiais - FEMAT, Campus de Marabá – CAMAR, Universidade Federal do Pará – UFPA.

Realizou-se uma extensa pesquisa bibliográfica sobre concreto, ensaio de compressão, as principais propriedades mecânicas do concreto e normas técnicas brasileiras. Técnicas de modelagem tridimensional foram utilizadas no desenvolvimento do projeto do compressômetro para finalmente ser fabricado o protótipo.

Realizaram-se vários ensaios no Laboratório de Controle Tecnológico da obra e estes resultados foram comparados com a fórmula empírica de determinação do módulo de elasticidade para aprovação do compressômetro. Os resultados obtidos apresentaram uma boa correlação com a formulação empírica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Determinação de propriedades mecânicas de materiais empregados na construção civil e proporcionando um controle de qualidade mais efetivo na região norte do Brasil.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Comparar os resultados do módulo de elasticidade do concreto obtidos nos ensaios de compressão auxiliado do compressômetro com uma fórmula empírica da revisão da norma NBR 6118 (NB 1) – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, para verificar se o compressômetro construído está apto para ser aprovado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre concreto e a sua composição, correlação com as propriedades (resistências mecânicas, fragilidade e formas dos grãos), ensaio de compressão, as principais propriedades mecânicas, revisão da NBR 6118 (NB1), aceitação definitiva e compressômetro que foram de suma importância para o presente trabalho.

3.1 CONCRETO

O concreto é um compósito comum, feito com partículas grandes, onde as fases matriz e dispersa são compostas por materiais cerâmicas. Uma vez que os termos “concreto” e “cimento” são algumas vezes incorretamente trocados, talvez seja apropriado fazer uma distinção entre eles. Em sentido mais amplo, o termo concreto subentende um material compósito que consiste em um agregado de partículas ligadas umas às outras em um corpo sólido através de algum tipo de meio de ligação, isto é, um cimento. Os dois tipos de concreto mais familiares são aqueles feitos com cimentos portland e asfáltico, onde o agregado é a brita e a areia. O concreto asfáltico é amplamente utilizado, principalmente como material de pavimentação, enquanto o concreto de cimento portland é empregado extensamente como material estrutural de construção [2].

3.2 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

O concreto pode ser definido como uma mistura devidamente proporcional de agregados graúdo e miúdos, com um aglomerante, água e eventualmente, aditivos químicos e adições minerais. O aglomerante utilizado na maioria dos concretos é o cimento Portland [3].

Segundo Callister [2] os ingredientes para esse concreto são o cimento Portland, um agregado fino (areia), um agregado grosseiro (brita) e água. As partículas agregadas atuam como um material de enchimento para reduzir o custo global do concreto produzido, pois elas de baixo custo, enquanto o cimento é relativamente caro. Para atingir a resistência ótima e a operacionalidade de uma mistura de concreto, os ingredientes devem ser adicionados nas proporções corretas. O empacotamento denso do agregado e um bom contato interfacial são

obtidos ao se ter partículas com dois tamanhos diferentes; as partículas finas de areia devem preencher os espaços vazios entre as partículas de brita. Normalmente, esses agregados compreendem entre 60 e 80% do volume total. A quantidade da pasta cimento-água deve ser suficiente para cobrir todas as partículas de areia e brita, de outra forma a ligação de cimentação será incompleta. Além disso, todos os constituintes devem ser misturados por completo. Uma ligação completa entre o cimento e as partículas agregadas é dependente da adição da quantidade correta de água. Pouca água leva a uma ligação incompleta, enquanto muita água resulta em uma porosidade excessiva; em ambos os casos, a resistência do produto final é inferior à ótima.

A natureza das partículas de agregado é uma consideração importante. Em particular, a distribuição de tamanhos dos agregados influencia a quantidade da pasta cimento-água que é necessária. Ainda, as superfícies devem estar limpas e isentas de argila e sedimentos, os quais impedem a formação de uma ligação eficiente na superfície da partícula.

O concreto de cimento portland é um importante material de construção, principalmente porque ele pode ser derramado no local e endurece à temperatura ambiente, mesmo quando se encontra submerso em água. Contudo, como um material estrutural, existem algumas limitações e desvantagens. Como a maioria das cerâmicas, o concreto de cimento portland é relativamente fraco e extremamente frágil; o seu limite de resistência à tração é aproximadamente 10 a 15 vezes menor do que a sua resistência à compressão. Ainda, as grandes estruturas em concreto podem experimentar uma considerável expansão e contração térmica devido a flutuações de temperatura. Além do que, a água pode penetrar no interior dos poros externos, o que por sua vez pode causar trincamentos severos em condições de clima frio, como uma consequência de ciclos de congelamento e descongelamento. A maioria dessas inadequações pode ser eliminada, ou pelo menos melhoradas, através de reforço e/ou da incorporação de aditivos.

Segundo Lima, Barboza e Gomes [3] a mistura do cimento com a água denomina-se pasta. Adicionando o agregado miúdo à pasta, obtém-se o que se denomina argamassa. Já o concreto é a mistura de agregado graúdo à argamassa.

Os agregados ocupam o maior volume de concreto e influem diretamente nas principais propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. São importantes também por diminuírem o custo do concreto, pois são mais baratos que a pasta de cimento. Além desse fator, também exercem influência benéfica ao diminuírem a retração e por serem mais duráveis e resistentes que a pasta.

Como agregado graúdo emprega-se a pedra britada, popularmente conhecida por

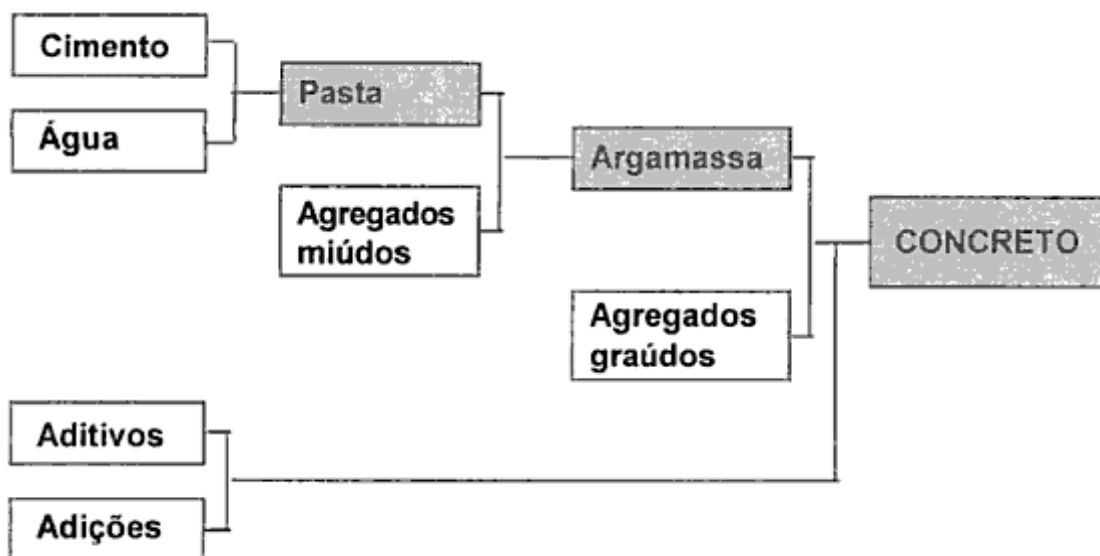
brita, que pode ser de diversas origens mineralógicas, que sejam: granitos, gnaisses, basaltos, traquitos, cascalhos.

O agregado miúdo mais usado é a areia natural quartzosa extraído em leito de rios, sendo bastante empregada também areias artificiais obtidas no processo de britagem de rochas na produção do agregado graúdo.

Com o objetivo de modificar as características do concreto e dos seus componentes (pasta e argamassa), no estado fresco ou endurecido, podem ser adicionados produtos denominados de aditivos químicos. Os aditivos mais utilizados são: redutores de água (plastificantes e superplastificantes), incorporadores de ar, retardadores de pega (endurecimento), aceleradores de pega e impermeabilizantes.

Pode-se, ainda, adicionar outros materiais com o objetivo de atingir propriedades específicas para o concreto, tais como: adições minerais, fibras, polímeros etc. O esquema apresentado na Figura 1 resume a sequência de obtenção do concreto.

Figura 1 – Sequência de obtenção do concreto



Fonte: LIMA, BARBOZA & GOMES, 2003.

3.3 CORRELAÇÃO COM AS PROPRIEDADES DO CONCRETO

3.3.1 Resistências mecânicas

Segundo Bauer [4] a resistências mecânicas do concreto são:

a. *À compressão.* Os agregados naturais e os produzidos de rochas sãs, como granito, gnaisse, basalto, hematita, barita, assim como os de escória de alto-forno, têm resistência à compressão muito superior à da argamassa de concretos de composição usual (f_{ck} -20-30 MPa), não apresentando, sob o ponto de vista da resistência, qualquer restrição ao uso em concretos de características normais.

Nos concretos de muito alta resistência, como os que se obtêm com cimentos de alta resistência e adição de micro sílica (f_{ck} da ordem de 50-70 MPa), a resistência dos grãos do agregado pode ser insuficiente, rompendo-se o concreto por fratura dos grãos, mesmo com agregado graúdo provindo de granito. Nestes casos, é preciso dar atenção especial à escolha do agregado.

Se o agregado provém de algumas rochas sedimentares, como o arenito, precisará ter sua resistência previamente verificada, mesmo que se trate de concreto comum.

b. *Tração e choque.* Durante a betonagem, alguns dos maiores grãos do agregado podem receber choques, mas os esforços geram tensões muito abaixo das taxas de ruptura dos agregados. Na confecção do concreto, estas características dos agregados não necessitam ser levadas em consideração.

c. *Abrasão.* Em algumas aplicações do concreto a resistência à abrasão é característica a levar em conta. Em pistas de aeroportos principalmente, em vertedouros de barragens e em pistas rodoviárias, o concreto sofre forte atrição. Nestes casos, é essencial o emprego de agregados de alta resistência à abrasão.

3.3.2 Fragilidade

Segundo Bauer [4] o esmagamento é uma das características dos grãos de agregados que não necessita levar em conta para aplicação em concreto. Mesmo as rochas mais frágeis (como o basalto, por exemplo) têm, neste campo, propriedade muito além das mínimas necessárias para que os grãos não se alterem durante o preparo e posterior

lançamento do concreto.

3.3.3 Forma dos grãos

Segundo Bauer [4] a forma dos grãos do agregado graúdo influi na qualidade do concreto, ao alterar a trabalhabilidade; afetando, em consequência, as condicionantes de bombeamento, lançamento e adensamento.

Os grãos podem ser classificados, segundo a forma, em *cubóides*, *alongados e lamelares*: O cascalho apresenta grande porcentagem de grãos cubóides, de formas arredondadas e superfícies lisas. Os agregados industrializados têm formas de grãos que dependem da natureza da rocha mãe e, para uma mesma rocha, do tipo de britador final da linha de britagem, grãos esses de arestas vivas e de superfície altamente rugosa. Assim, britas provenientes de basalto e produzidas em britadores de mandíbulas possuem grande porcentagem de grãos irregulares, alongados e lamelares; as provenientes de granito calcário têm menor porcentagem. As britas de basalto, para se apresentarem com porcentagem de grãos disformes da mesma ordem de grandeza das de granito, necessitam ser processadas em rebritadores de cone especiais ou rebritadores de martelo.

Os grãos irregulares têm maior superfície específica que os cubóides e têm, ainda, o inconveniente de poderem ficar presos entre as barras da armação do concreto armado, do que resulta enchimento irregular da forma, dando causa a ninhos de rato, fenômeno altamente nocivo ao desempenho de peças estruturais. A alta trabalhabilidade possível com concretos preparados com pedregulhos (cascalho) deve-se não só às formas arredondadas dos grãos, mas também à lisura das suas superfícies.

Quando aumenta a porcentagem de alongados e lamelares, o concreto perde trabalhabilidade. Mantido invariável o traço, concretos preparados com cascalho, brita de granito e brita de basalto produzida em britadores de mandíbulas têm trabalhabilidade sequencialmente decrescente (menores abatimentos no ensaio de cone).

Em consequência, para que se consiga obter de um concreto feito com brita de baixo teor de grãos disformes a mesma resistência de um outro feito com brita de baixo teor, haverá necessidade de alterar o traço. No primeiro caso, para as mesmas condições de abatimento e de resistência à ruptura, o concreto terá de ter um traço mais rico em finos e mais águas de amassamento. De tudo isto, resulta um aumento do teor de cimento e um concreto mais dispendioso.

A obtenção, nas pedreiras, de brita sem excesso de grãos irregulares torna-se de alta prioridade, sobretudo se leva em conta que o principal mercado de brita é o de agregado para concreto. O dimensionamento e a escolha dos rebitadores são questões primordiais.

Por outro lado, os grãos irregulares, justamente devido à sua forma e textura superficial, apresentam maior aderência da argamassa, resultando os concretos com eles confeccionados possuírem maior resistência – mantidas inalteradas as demais condições de traço – do que os confeccionados com pedregulhos de grão cubóide e superfície.

3.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Segundo o Callister [2], os ensaios tensão-deformação de compressão podem ser conduzidos se as forças nas condições de serviço forem desse tipo. Um ensaio de compressão é conduzido de uma maneira semelhante à de um ensaio de tração, exceto pelo fato de que a força é compressiva e o corpo de prova se contrai ao longo da direção da tensão. As equações 1 e 2 são calculadas a tensão e a deformação de compressão, respectivamente.

A tensão de engenharia σ é definida pela relação

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

onde F é a carga aplicada em uma direção perpendicular à seção reta da amostra, em unidades de Newton (N) ou libras (lb_f), e A_0 representa a área da seção reta original antes da aplicação de qualquer carga (m^2 ou $pol.^2$). As unidades da tensão de engenharia (doravante chamada somente por tensão) são megapascals, MPa (SI) (onde $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N/m}^2$), e libras-força por polegada quadrada, psi (Unidade Usual nos Estados Unidos).

A deformação de engenharia ε é definida de acordo com a expressão

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

onde l_0 é o comprimento original antes de qualquer carga ser aplicada, e l_i é o comprimento

instantâneo. Algumas vezes a grandeza $l_i - l_0$ é simbolizada por Δl , e representa o alongamento da deformação ou a variação no comprimento a um dado instante, conforme referência ao comprimento original. A deformação de engenharia (doravante denominada somente por deformação) não possui unidades.

Por convenção, uma força compressiva é considerada como sendo negativa, o que produz uma tensão também negativa. Além disso, uma vez que l_0 é maior do que l_i , as deformações compressivas calculados a partir da equação 2 são necessariamente, também negativas.

Os resultados numéricos obtidos no ensaio de compressão são similares aos obtidos no ensaio de tração. Os resultados de ensaio são influenciados pelas mesmas variáveis do ensaio de tração (temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e condições ambientais). Contudo, a utilização na indústria de construção civil (concreto) deve levar em conta o teor de água contido nos corpos de prova [5].

3.5 AS PRINCIPAIS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

As principais propriedades mecânicas do concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas. Geralmente, os ensaios são realizados para controle da qualidade e atendimento às especificações [6].

Este trabalho enfatiza as propriedade de resistência à compressão e principalmente o módulo de elasticidade devido estes estarem relacionados com ensaio de compressão no qual utilizamos o compressômetro que é o foco desse trabalho.

3.5.1 Resistência à compressão do concreto

Segundo Lima, Barboza e Gomes [3] a principal propriedade do concreto endurecido é a sua resistência à compressão. Além de ser facilmente quantificável, permite se determinar, a partir dela, para um determinado traço, outras propriedades do concreto como resistência à tração e módulo de deformação longitudinal.

Outra importância de se determinar esta propriedade do concreto é a de se poder estimar o tempo necessário para a retirada das fôrmas, garantindo a segurança dos que trabalham na obra.

O ensaio utilizado para a determinação da resistência à compressão do concreto é o ensaio de rompimento do corpos-de-prova, realizado por laboratório especializado para cada lote de concreto, obedecendo as recomendações da NBR 5739. Os corpos-de-prova normalizados no Brasil são cilíndricos, com a altura igual a duas vezes o diâmetro da base, cujo valor depende da dimensão máxima características do agregado graúdo. Para os concretos usuais empregam-se os moldes com dimensões de 15 cm de diâmetro da base por 30 cm de altura e os de 10 cm de diâmetro da base por 20 cm de altura.

A moldagem de corpos-de-prova cilíndricos que constituem os exemplares do concreto pode ser feita pelo laboratório ou por pessoal da própria obra, devidamente treinado, conforme o planejamento da coleta de amostras estabelecido previamente. Tais amostras devem ser coletadas do terço médio do caminhão, obedecendo-se à moldagem de dois corpos-de-prova para cada exemplar e para cada idade. Por exemplo, se a resistência deve ser medida aos 3,7 e 28 dias então o exemplar será formado por seis corpos de prova.

A moldagem dos corpos-de-prova é uma etapa importante na determinação da resistência à compressão do concreto. Ela é feita ainda na obra e, caso não seja efetuada de acordo com a norma (NBR 5738), os valores obtidos para as resistências à compressão não representarão a qualidade do concreto obtido.

O volume de concreto retirado para moldagem dos corpos-de-prova deve ser homogeneizado antes de ser colocado no moldes. Os corpos-de-prova devem ser moldados numa base nivelada, livre de choques e vibrações, no local onde devem permanecer as primeiras 24 horas, protegido do sol, chuva e vento.

Antes da moldagem, os moldes deverão estar perfeitamente vedados, limpos e untados com óleo mineral (deve-se ter o cuidado de escoar o excesso de óleo antes da moldagem). No ato da moldagem deve-se ter o cuidado de se evitar a coleta de excesso de argamassa ou agregado graúdo, em relação à massa misturada. Não deve passar de 10 minutos o tempo entre a coleta da amostra e o final da moldagem dos corpos-de-prova. A amostra deve ser colocada no molde, fazendo-se uso de uma concha metálica.

Os moldes de 15 cm x 30 cm devem ser preenchidos simultaneamente em 4 camadas, e os de 10 cm x 20 cm, em duas camadas de alturas aproximadamente iguais.

O processo de adensamento depende do abatimento do concreto de acordo com a Tabela

Tabela 1 – Processo de adensamento

Abatimento a (mm)	Processo de adensamento
$a < 20$	Vibratório
$20 \leq a < 60$	Manual ou vibratório
$60 \leq a < 180$	Manual
$a > 180$	Manual

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738, 2008.

No caso de adensamento manual, a haste de socamento deve ser confeccionada em aço e ter 600 mm de comprimento, 16 mm de diâmetro e extremidade de socamento semi-esférica. Cada camada deve ser feita aplicando-se 30 golpes para os moldes de 15 cm x 30 cm, e 15 golpes para os moldes de 10 cm x 20 cm, [ver] Tabela 2.

Tabela 2 – Número de golpes no adensamento manual

Adensamento	Dimensão Máxima (mm)	Número de camadas	Número de golpes por camada
Manual	100	2	15
	150	4	30
	250	5	75
Vibratório (penetração de agulha até 200 mm)	100	1	-
	150	2	-
	250	3	-
	450	5	-

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738, 2008.

No adensamento de cada camada, a haste de socamento não deve penetrar na camada já adensada, e, após o adensamento de cada camada, deve-se bater levemente nas laterais do molde para provocar o fechamento e eventuais vazios,

O acabamento da superfície do corpo de prova deverá ser executado com colher-de-pedreiro.

No caso de adensamento vibratório, deve-se colocar todo o concreto da camada antes da vibração. O tempo de vibração deve ser o suficiente para o concreto apresentar uma superfície relativamente plana e brilhante.

O vibrador não deve encostar nas laterais e no fundo do molde e deve ser retirado lenta e cuidadosamente do concreto. Deve-se bater nas laterais do molde de forma que se

elimine as bolhas de ar e eventuais vazios criados pelo vibrador.

Após o adensamento, deve-se colar sobre a superfície de todos os corpos de prova moldados uma etiqueta com os seguintes dados:

- número do exemplar
- data e hora da moldagem
- referência (peça concretada, pavimento, etc)
- nome da construtora e obra
- nome do moldador

Uma vez moldados os corpos-de-prova, depois de 24 horas, eles devem ser desmoldados e levados ao laboratório, onde serão feitos os rompimentos nos dias determinados para controle, assim obtendo-se as resistências à compressão correspondentes.

3.5.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado [1]. O módulo de elasticidade no concreto é dado pela declividade da curva de tensão-deformação sob um carregamento uniaxial, segundo o que prescreve a NBR 8522–*Concreto –Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio*. A mesma determina três métodos de determinação dos módulos de deformação longitudinal, resumido segundo HELENE [7]:

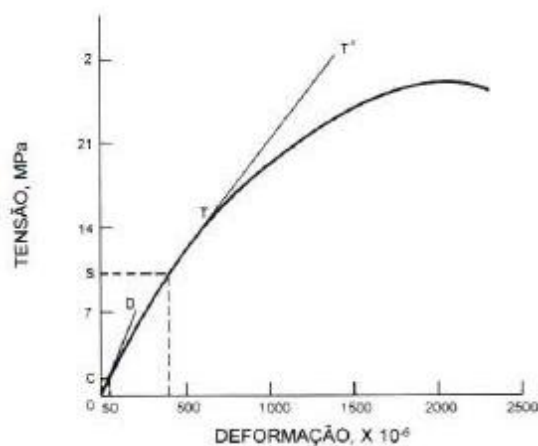
Módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido como módulo de elasticidade tangente inicial. Do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e 0,3 f_C e ao módulo de elasticidade secante a 0,3 f_C . Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_{ci} , geralmente expresso em GPa.

Módulo de deformação, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_C. Em geral trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5 MPa e 0,4 f_C , que é equivalente ao módulo de elasticidade secante a 0,4 f_C, pois esta é geralmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_c , geralmente expresso em GPa.

Módulo de deformação, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos

de tensão ou deformação específica. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado.

Figura 2 – Gráfico tensão X deformação

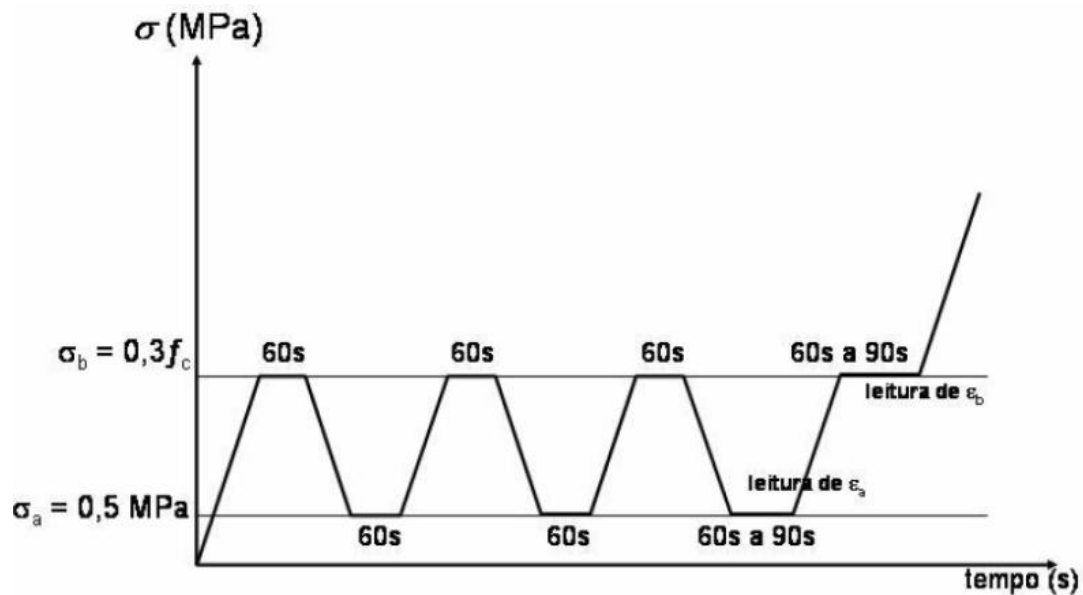


Fonte: MEHTA & MONTEIRO, 1994.

Na Figura 2 pode-se observar os três tipos de determinações do módulo de elasticidade, sendo a declividade do segmento OD o módulo tangente inicial, a declividade da reta correspondente à tensão SO corresponde ao módulo secante e a declividade da reta TT1 traçada tangente a qualquer ponto da curva tensão X Deformação corresponde ao módulo tangente. Outros tipos de módulo podem ser estabelecidos, tais como módulo dinâmico, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto, etc., em geral todos de pouca utilização prática.

Através deste ensaio, prescrito pela NBR 8522(2003), o Módulo de Elasticidade inicial (Eci) é obtido relacionando tensões e deformações do corpo de prova feito por uma amostra do concreto empregado. Segundo o procedimento desta norma, deve-se inicialmente romper dois corpos-de-prova idênticos com intuito de se obter a resistência a compressão (f_c). Obtido o valor da resistência à compressão estimada, f_c , determinam-se os níveis de carregamento para o cálculo das deformações em mais três corpos. A Figura 3 resume a forma e intensidade do carregamento aplicado [8].

Figura 3 – Representação do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade inicial (Eci)



Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522, 2003.

Após a leituras das deformações e tensões aplicadas, usa-se a Equação (3) no cálculo de E_{ci} .

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (3)$$

Onde:

σ_b = Tensão maior em megapascals ($\sigma_b = 0,3f_c$)

σ_a = Tensão menor em megapascals ($\sigma_a = 0,5 \text{ Mpa}$)

ε_b = Deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior

ε_a = Deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão menor

Após todas as leituras, aumenta-se a carga até a ruptura do corpo-de-prova, obtendo sua resistência. Se sua resistência diferir em 20% de f_c , descarta-se o resultado.

3.6 REVISÃO DA NBR 6118 (NB 1) – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO - PROCEDIMENTO

Segundo VASCONCELOS [9] a revisão em curso da NB 1, tendo recebido numerosas críticas dos tecnologistas de concreto, afirmando que o valor E_c calculado pela versão de 1978 é muito grande e fora da realidade brasileira, decidiu reduzir consideravelmente seu valor, tomando como base ensaios feitos na COPPE, no Rio de Janeiro e a Norma Americana ACI 318 -95. Foi proposta a expressão (valores em MPa):

$$E_c = 4700 \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

Com o coeficiente 4700 da Norma Americana substituindo o valor 4250 encontrado nos ensaios da COPPE. Julgou-se que a redução de 36% do valor atual de 6600 para 4250 seria exagerada, aplicável somente aos agregados usuais no Rio de Janeiro. A redução menor, de 6600 para 4700 (29 %) seria mais apropriada considerando os agregados mais usuais em outros Estados.

3.7 ACEITAÇÃO DEFINITIVA

Segundo Lima; Barboza e Gomes [3], para a aceitação definitiva de um determinado lote de concreto, calcula-se a resistência característica à compressão estimada (f_{ckest}) para cada idade em função dos resultados obtidos nos ensaios de ruptura dos corpos-de-prova e compara-se este valor com a resistência característica (f_{ck}) estabelecida no projeto. O lote deve ser aceito caso o valor do f_{ckest} resulte maior ou igual a f_{ck} . Caso a resistência característica estimada resulte inferior à resistência característica de projeto, o engenheiro da obra deve consultar o projetista da estrutura e o fornecedor do concreto para devidas providências.

O cálculo de f_{ckest} para cada lote deve ser feito pelo engenheiro, responsável técnico da obra, ou pelo próprio laboratório de controle tecnológico do concreto, quando acordado anteriormente. Apresenta-se a seguir os roteiros de cálculo da resistência característica estimada para os diversos tipos de amostragem.

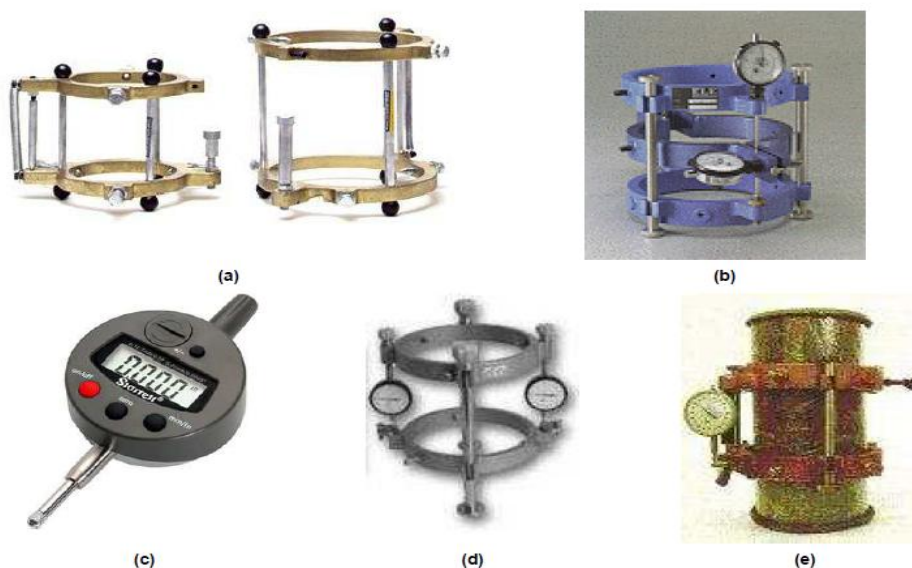
3.8 COMPRESSÔMETRO

O compressômetro é um aparelho utilizado para medir o módulo de elasticidade de corpos de prova de concreto, com dois relógios comparador com resolução de 0,001 mm, para leitura direta no ensaio. Fabricado em ferro fundido, disponível para corpos de prova \varnothing 10x20cm.

Segundo MONTIJA [10] os instrumentos para medição das deformações mais comuns utilizados no ensaio de determinação do módulo estático de deformação do concreto são: compressômetro com relógios comparadores, compressômetro com transdutores de deslocamento indutivos (linear variable differential transformer ou LVTD), transdutores resistivos ou extensômetros elétricos tipo strain gages de colagem superficial, de imersão ou de ancoragem tipo clip gage. Todos eles foram desenvolvidos para trabalhar na captação, pelo operador, a partir do ponto central da altura do corpo de prova. Em geral, a captação dessa deformação se dá sobre uma base de medida longitudinal de comprimento igual ao diâmetro do corpo-de-prova, o que a faz ultrapassar o comprimento do terço central da altura do corpo-de-prova.

Na figura 4 estão representados alguns modelos de compressômetro e compressômetros com relógios comparadores acoplados.

Figura 4 – Instrumentos para medição da deformação: (a) dispositivos compressômetros; (b) compressômetro-expansômetro; (c) relógio comparador; (d) compressômetro com 2 relógios comparadores; (e) compressômetro com 1 relógio comparador.



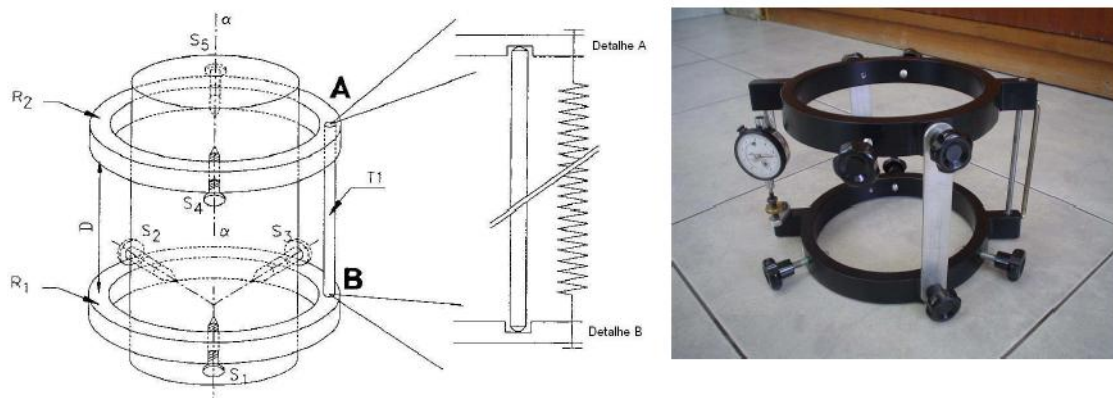
Fonte: MONTIJA, 2007.

Os compressômetros-expansômetros são dispositivos mundialmente conhecidos devido à sua divulgação na norma norte-americana ASTM C-469 desde a década de 1960 como aparelhagem básica para o ensaio de módulo de deformação do concreto. O dispositivo dito compressômetro é aquele utilizado para a ancoragem do medidor de deformação propriamente dito para leitura da deformação longitudinal do corpo-de-prova. A parte dita expansômetro é complementar à estrutura do dispositivo anterior e é utilizada para instalação de outro medidor de deformação para leitura de deformação transversal do corpo-de-prova enquanto solicitado à compressão no eixo longitudinal; é utilizada para determinação do coeficiente de Poisson do concreto.

O compressômetro idealizado e apresentado na norma técnica ASTM C-469 tem uma representação na Figura 5. Nesta figura, estão as partes principais da estrutura do aparelho, conforme segue:

- S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 são os parafusos de ancoragem no corpo-de-prova;
- R_1, R_2 são os chamados *yokes* de sustentação do medidor de deformação propriamente dito;
- T_1 é o conjunto pino-mola para transferência de deformação de um dos lados dos *yokes* para o outro em que está instalado o medidor de deformação, conforme detalhe A-B da figura;
- D representa a posição de instalação do medidor da deformação e também a distância entre *yokes* que, na prática, corresponde ao comprimento inicial do trecho onde será feita a medida.

Figura 5 – Detalhes do dispositivo compressômetro



Fonte: MONTIJA, 2007.

A instalação de um segundo medidor de deformação no compressômetro pode ser

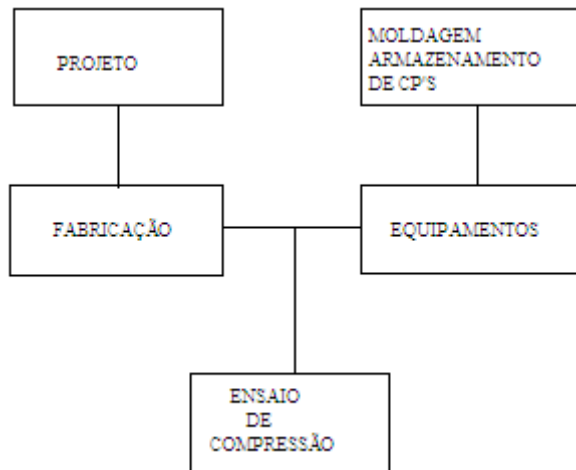
feita mediante a remoção do conjunto pino-mola. Neste caso, a deformação longitudinal admitida em ensaio pode ser tomada como a média das deformações individuais nos medidores. Neste caso, há uma controvérsia a respeito da necessidade de modificação no número e na disposição dos parafusos de ancoragem no *yoke* superior; para muitos, este deverá passar a repetir a configuração de três parafusos já utilizada na configuração do *yoke* inferior.

Os medidores mais comuns acoplados ao compressômetro são os relógios comparadores. Resumidamente, seu mecanismo de funcionamento reage através de um pino de detecção da deformação (pino apalpador) em contato com um anteparo a uma força imposta pela aproximação dos *yokes* durante a compressão do corpo-de-prova.

4 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho, adotou-se um planejamento conforme o fluxograma mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma das etapas da metodologia do projeto



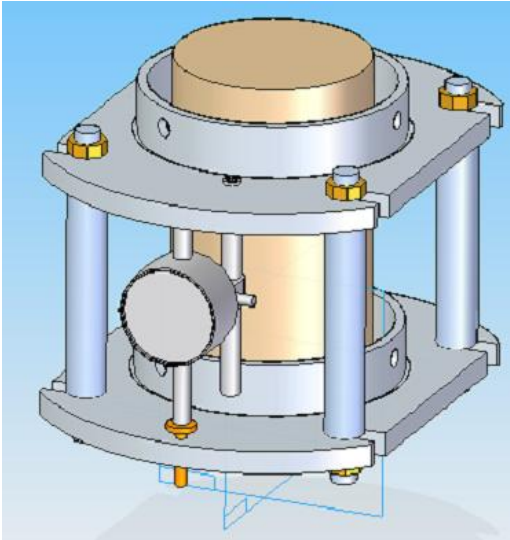
Fonte: Autor, 2013.

Primeiramente foi feito o projeto do compressômetro através de um desenho tridimensional em software e então seguindo as dimensões do desenho foi possível a fabricação do dispositivo, posteriormente os CP's de concreto foram moldados e armazenados no Laboratório de Controle Tecnológico da obra Shopping Center Pátio Marabá e utilizando os equipamentos necessário que forma a prensa hidráulica do laboratório com o compressômetro fabricado foram realizados vários ensaios de compressão.

4.1 PROJETO E FABRICAÇÃO DO COMPRESSÔMETRO

Foi modelado tridimensionalmente o compressômetro em software CAD-3D (Desenho Tridimensional Assistido por Computador) Solid Edge, [ver] Figura 7, através desta modelagem foi possível fabricar o aparelho com as bases de ferro fundido, suportes parafusados na base superior para dois relógios comparadores com resolução de 0,001 mm, para leitura direta e com capacidade para realização de ensaio de compressão de corpos de prova de concreto com \varnothing 10x20 cm, [ver] Figura 8.

Figura 7 – Modelo do compressômetro com o corpo de prova



Fonte: Autor, 2013.

Figura 8 – Protótipo construído



Fonte: Autor, 2013.

4.2 MOLDAGEM E ARMAZENAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem e o armazenamento dos corpos de prova foram realizados de acordo com as normas NBR 5738 – Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova [8].

Após o concreto ser aceito por meio do ensaio de abatimento, coletou-se uma amostra representativa para o ensaio de resistência no qual não é permitido retirar amostras, nem no início e nem no final da descarga da betoneira; a amostra foi colhida no terço médio do caminhão-betoneira utilizando um carrinho de mão. Em seguida, a amostra foi homogeneizada pra assegurar sua uniformidade.

Os corpos de prova (100 mm x 200 mm) aplicaram-se 12 golpes em cada camada de concreto, totalizando duas camadas iguais e sucessivas, posteriormente deixaram-se os corpos-de-prova nos moldes, sem sofrer perturbações e em temperatura ambiente por 24 horas; após este período foram identificados os corpos-de-prova e transferiu-os para os tanques de armazenamento que ficaram até o momento de serem rompidos para atestar sua resistência, [ver] Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Corpos de prova nos moldes.



Fonte: Autor, 2013.

Figura 10 – Tanques de armazenamento.



Fonte: Autor, 2013.

4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO

Os equipamentos utilizados para realização do ensaio de compressão são um prensa hidráulica manual com dois manômetros com capacidade para 100 toneladas força da marca SOLOTEST, um compressômetro com dois relógios comparadores e disponíveis para corpos de prova $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$, [ver] Figura 11.

Figura 11 – Ensaio de compressão



Fonte: Autor, 2013.

4.3.1 Execução do ensaio de compressão e determinação do módulo de elasticidade

Foram realizados ensaios de compressão em vários corpos de prova cilíndricos de concretos com resistência característica (f_{ck}) 30 MPa e 40 MPa com idades de 28 dias para determinar resistência característica à compressão estimada (f_{ckest}), módulo de elasticidade (E_{ci}) de acordo com a norma NBR 8522 e a partir da tensão de ruptura também foi determinado os módulos de elasticidade dos CP's através da norma revisada da NBR 6118 (NB 1) – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, posteriormente comparou-se os

resultados.

Para realização dos ensaios de cada lote, inicialmente 2 corpos-de-prova foram ensaiados para determinação da resistência à compressão (f_c) de acordo com a NBR 5739 em uma prensa com capacidade para 100 toneladas, para que houvesse uma previsão da tensão de ruptura à compressão, de acordo com a recomendação da NBR 8522. Com os dados da tensão de ruptura à compressão, pode-se calcular o percentual de carga última adequado ao tipo de determinação do módulo de elasticidade. Neste caso, foi usada a determinação através do módulo tangente inicial, utilizando o plano de carga de determinação do módulo de elasticidade.

Para atender esta especificação, foi aplicado o plano de carga variando de 0,5 MPa até 30% do f_c , sendo utilizados 3 corpos-de-prova irmãos, de acordo com NBR 8522. Aplicou-se primeiramente 30% do f_c e rapidamente fez-se a leitura dos relógios comparadores do compressômetro e aguardou 60 s e posteriormente reduziu a carga da prensa para 0,5 MPa e fez-se também a leitura dos relógios comparadores e aguardou 60 s, repetiu-se este procedimento mais duas vezes de acordo com a norma NBR 8522 para encontrar as deformações específicas do corpos de prova sob tensão maior ϵ_b e tensão menor ϵ_a . Após encontrar estas deformações e com as forças em Mpa da tensão maior e básica utilizou-se a equação 3 para encontrar o módulo de elasticidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de f_{ckest} , E_{ci} e $E_{ci} - NB1$ estão nas tabelas 3 a 6.

Tabela 3 – Módulo de Elasticidade (E_{ci}) de CP's do Lote I com f_{ck} 30 MPa.

Corpo de prova	f_{ckest} (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_{ci} (GPa) - NB1
1	37	24,3	28,6
2	36,08	25,1	28,2
3	39,93	25,1	29,7
\bar{x}	37,7	24,8	28,8
δ	2,01	0,46	0,78

Fonte: Autor, 2013.

Tabela 4 – Módulo de Elasticidade (E_{ci}) de CP's do Lote II com f_{ck} 30 MPa.

Corpo de prova	f_{ckest} (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_{ci} (GPa) - NB1
1	41,9	28,4	30,4
2	39,62	26	29,6
3	39,46	27	29,5
\bar{x}	40,3	27,1	29,8
δ	1,36	1,21	0,49

Fonte: Autor, 2013.

Tabela 5 – Módulo de Elasticidade (E_{ci}) de CP's do Lote III com f_{ck} 30 MPa.

Corpo de prova	f_{ckest} (MPa)	E_{ci} (GPa)	E_{ci} (GPa) - NB1
1	31,72	23,1	26,5
2	41,04	24,2	30,1
3	38,9	33,4	29,3
\bar{x}	37,2	26,9	28,6
δ	4,9	5,7	1,9

Fonte: Autor, 2013.

Tabela 6 – Módulo de Elasticidade (Eci) de CP's do Lote IV com fck 40 MPa.

Corpo de prova	f_{ckest} (MPa)	Eci (GPa)	Eci(GPa) - NB1
1	42,16	28	30,5
2	37,38	27,9	28,7
3	40	25,4	29,7
\bar{x}	39,8	27,1	29,6
δ	2,39	1,47	0,90

Fonte: Autor, 2013.

Os CP's da Tabela 3 apresentaram o f_{ckest} entre 37 e 39,93 MPa sendo este resultado maior do que o esperado pois o f_{ck} de 28 dias é de 30 MPa. A média do módulo de elasticidade encontrado através dos ensaios de compressão obtidos pelo compressômetro feito de acordo com a NBR 8522 foram de 24,8 GPa com desvio padrão de 0,46 e a média Eci de acordo a norma NBR 6118 foi de 28,8 com desvio padrão de 0,78.

Os CP's da Tabela 4 apresentaram o f_{ckest} de até 41,9 MPa. A média do Eci foi de 27,1 GPa com desvio padrão de 1,21 e a outra feita através da norma NB1 foi 29,8 GPa. A Tabela 5 mostrou o f_{ckest} entre 31,72 e 41,04 MPa maiores que o seu f_{ck} e a média do Eci foi de 26,9 GPa com um desvio padrão alto de 5,7 e a outra feita através da norma NB1 foi 28,6 GPa com uma desvio padrão mais baixo de 1,9.

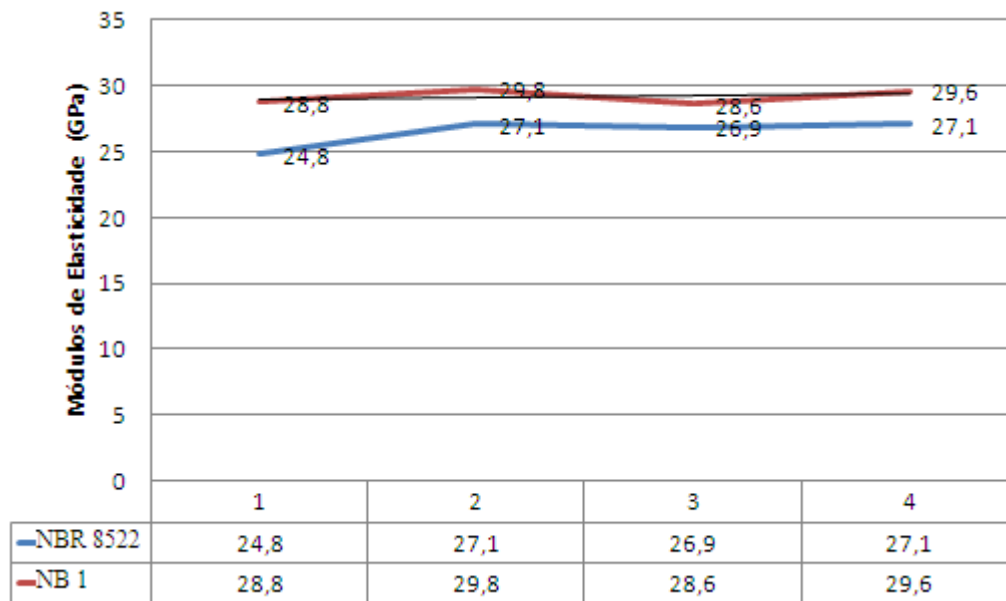
A Tabela 6 apresentou um f_{ckest} de 37, 38 MPa sendo este menor do que o seu f_{ck} de 28 dias que é 40 MPa mas os demais foram igual e maior, sucessivamente, 40 e 42,16 MPa. As médias do Eci do ensaio e da norma NB1 foram sucessivamente, 27,1 e 29,7 GPa e estes apresentaram um desvio padrão baixo.

Os CP's de concreto Ø 10x20 cm apresentaram o f_{ckest} maiores do que os seus f_{ck} , exceto o segundo CP da Tabela 6 que foi 37,38 no qual o resultado esperado seria igual ou maior a 40 MPa.

Na figura 12 podemos perceber que as médias do Eci da Tabela 3 representado pelo ponto 1 de acordo com a NBR 8522 foi 24,8 GPa e conforme a NB1 foi 28,4 GPa tendo uma diferença de 4 GPa, no ponto 2 representado a tabela 4 teve uma diferença de 2,7 GPa sendo este menor, possivelmente foram moldados mais adequadamente. Observando as linhas da figura abaixo se percebe que o ponto 3 que representa as média do Eci da tabela 5 ficaram mais próximos de todos os pontos, tendo uma diferença de 1,7 GPa e possivelmente foram os CP's do lote mais bem moldados, apresentando mais planicidades nas superfícies que é de grande importância pois ajuda a medir com mais precisão a deformação do concreto durante o

ensaio, sendo que quanto mais próximo o Eci da NBR 8522 da NB1 maior será a eficiência do compressômetro. O ponto 4 representando a tabela 6 teve uma diferença dos Eci de 2,5 no qual também ficou próximo da NB 1. Então a eficácia deste aparelho na execução dos ensaios dos CP's de concreto medindo aproximação dos resultados dos Eci de acordo com a NBR 8522 com a fórmula empírica da NB 1 do ponto 1 foi de 86,1%, dos pontos 2, 3 e 4 mostraram, sucessivamente, 90,9%, 94% e 91,5%. O compressômetro teve uma média de eficácia de 90,6 %.

Figura 12 – Média Aritmética dos módulos de elasticidade.



Fonte: Autor, 2013.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A moldagem é um fator muito importante para determinação do módulo de elasticidade, possivelmente houve pequenas alterações nos resultados devidos alguns CP's não estarem moldados adequadamente, pois é difícil diante da grande quantidade de concreto que chega à obra todas as amostras estiverem perfeitamente moldadas.

O lote III de concreto da tabela 5 apresentou uma melhor correlação dos resultados obtidos de acordo com NBR 8522 com a fórmula empírica da NB 1 que os demais lotes, sendo assim durante a realização do ensaio obtivemos leituras dos relógios comparadores das deformações das tensões maiores e menores mais reais.

O compressômetro é um aparelho delicado e precisa ficar em ambientes isentos de poeiras e no Laboratório de Controle Tecnológico da obra Shopping Center Pátio Marabá no qual foram realizados os ensaios, constantemente tinha poeira devido às máquinas da obra. Os relógios comparadores do dispositivo são muito sensíveis e durante os ensaios acumulavam poeiras no pino dele dificultando as leituras.

O compressômetro apresentou resultados satisfatórios, sendo assim este aparelho está aprovado.

6.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Comparar os resultados do módulo de elasticidade do concreto obtidos nos ensaios de compressão com o compressômetro desenvolvido com outros destes homologados;
- Acrescentar um relógio comparador na transversal para obter também o coeficiente de Poisson;
- Substituir o ferro fundido por um material mais leve;

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, Ed. PINI, São Paulo, 1994.
- [2] CALLISTER Jr, WILLIAM D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- [3] LIMA, Flavio; BARBOZA, Alive; GOMES, Paulo. *Produção e Controle de Qualidade*. Maceió-AL: EDUFAL, 2003.
- [4] BAUER, F. L. A. *Materiais de Construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LCT, 1994.
- [5] GARCIA, Amauri. *Ensaio dos Materiais*. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [6] PINHEIRO, L. et. al. *Estruturas de Concreto – Capítulo 2*. Libânio M. Pinheiro, Cassiane D. Muzardo, Sandro P. Santos, Thiago Catoia, Bruna Catoia. Março de 2010. USP – EESC – Dep. Eng. de Estruturas. Disponível em: <<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/01%20Introducao.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2012.
- [7] HELENE, Paulo R.L. *Estudo da Variação do Módulo de Elasticidade do Concreto com a Composição e Características do Concreto Fresco e Endurecido*. Relatório Técnico do Convênio EPUSP-CPqDCC/ABCP, n.10.122, 1998.
- [8] NETO, M. M.; ALBUQUERQUE, A. T.; CABRAL, A. E. B. *Estudo do módulo de elasticidade de concretos produzidos em Fortaleza - CE - Brasil*. In: XXXIV JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, San Juan – Argentina.
- [9] VASCONCELOS, A. C. *O Misterioso Módulo de Elasticidade*. Fevereiro de 2009. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89-artigos/199-o-misterioso-modulo-de-elasticidade?format=pdf>> Acesso em: 27 nov. 2012.
- [10] MONTIJA, Fernando. *Aspectos variabilidade experimental do ensaio de módulo de*

deformação do concreto. 2007. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 2007.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro, 2008.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação - NBR 8522*. Rio de Janeiro, 2003.