

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CÍVIL**

LARISSA MARQUES CUNHA CABRAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO
SEGUNDO DIFERENTES NORMAS**

**RECIFE
2014**

Larissa Marques Cunha Cabral

**ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO
SEGUNDO DIFERENTES NORMAS**

Dissertação apresentada, como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Tecnologia das Construções, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP.

Orientadora: Professora Dr^a Eliana Barreto Monteiro.

Coorientador: Professor Dr. Paulo Helene.

Recife
2014

Cabral, Larissa M. C.

ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO
SEGUNDO DIFERENTES NORMAS, RECIFE, 2014.67p

Dissertação – Universidade Católica de Pernambuco – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Módulo de Elasticidade 2. Tipos de normas de módulo de elasticidade 3. Resistência à compressão 4. Propriedades do concreto. I. Universidade Católica de Pernambuco. Centro de Ciências e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
CIVIL

LARISSA MARQUES CUNHA CABRAL

**ANÁLISE COMPARATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE CALCULADO
SEGUNDO DIFERENTES NORMAS**

Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Eliana Barreto Monteiro

Orientadora - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof. Dra. Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira

Examinadora Interna - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof. Dr. Pedro Castro Borges

Examinador Externo -

Aprovado em 09 de Junho de 2014

Dedicatória

Aos meus pais (Antônio Luiz e Dayse),
as minhas irmãs (Nathalia e Juliana), ao
meu esposo Filipe e a minha pequena
Emília.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que a todo momento está comigo no comando de todas as coisas.

Aos meus pais, Antônio Luiz e Dayse, pelos ensinamentos constantes.

Às minhas irmãs (Nathalia e Juliana) pelo entusiasmo, amizade eterna e participação nos principais momentos de descontração.

Ao meu esposo Filipe, por existir em minha vida e compartilhar minhas alegrias e tristezas.

À Professora Eliana Monteiro pela oportunidade, ensinamentos, confiança, aprendizando e apoio, os quais foram fundamentais em minha formação.

Ao Professor Paulo Helene pelo seu apoio, colaboração e incentivo. Apesar da distância, sempre esteve presente.

À Tecomat, Prof. Joaquim Correa, pessoa amiga e admirada. Sempre com palavras sábias e fortes.

À Tecomat pelo apoio do grupo técnico e de toda a equipe do laboratório de concreto.

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil por estarem sempre a disposição dos alunos, contribuindo para construção de nosso conhecimento, em especial ao Professor José Orlando e a Professora Maria da Graça. Ao professor Angelo Just pela sua sabedoria.

Ao amigo André Miranda pelo seu apoio, colaboração e incentivo durante todo o período da minha formação.

A equipe do laboratório de materiais de construção da UNICAP, André Miranda e Washington Esposito, pela amizade e fundamental contribuição para os nossos experimentos.

Aos alunos de pesquisa Nicole, Guilherme e Ronildo pela ajuda e apoio no desenvolvimento do trabalho.

À Terezinha Bezerra pela paciência e gentileza de sempre estar cuidando de mim.

À Equipe da Supermix Concreto da unidade de Recife, especialmente Alysson Schiavinato pela ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

“A ponte não é de concreto, não é de ferro, não é de cimento. A ponte é até onde vai o meu pensamento”.

Lenine

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Tabela 1 – Tipos de agregados com módulo de elasticidade (Adaptado Metha & Monteiro, 2008).....	26
Tabela 2	Comparação entre procedimentos de normas para ensaio de ultra-som (Fonte: Evangelista, 2002; Benetti, 2012).....	31
Tabela 3	Tabela 3 – Efeito do tipo de agregado em relação ao módulo de elasticidade (Fonte: fib Model Code, 2010).....	33
Tabela 4	Tabela 4 – Expressões para estimativa do módulo de elasticidade segundo modelos de previsão.....	34
Tabela 5	Característica física e mecânica do cimento portland composto (CP II E 40).....	36
Tabela 6	Característica física da areia.....	38
Tabela 7	Característica física da brita.....	38
Tabela 8	Escolha da consistência do concreto em função do tipo de elemento estrutural, para adensamento mecânico (Fonte: helene, 1992).....	40
Tabela 9	Dosagem dos traços de concreto plástico.....	46
Tabela 10	Dosagem dos traços de concreto auto adensável.....	46
Tabela 11	Resultados experimentais aos 3 dias para o concreto plástico.....	49
Tabela 12	Resultados experimentais aos 7 dias para o concreto plástico.....	49
Tabela 13	Resultados experimentais aos 28 dias para o concreto plástico.....	49
Tabela 14	Resultados experimentais aos 91 dias para o concreto plástico.....	50
Tabela 15	Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 3.....	50
Tabela 16	Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 5.....	50
Tabela 17	Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 6.....	50
Tabela 18	Resultados experimentais aos 3 dias para o SCC.....	50
Tabela 19	Resultados experimentais aos 7 dias para o SCC.....	50
Tabela 20	Resultados experimentais aos 28 dias para o SCC.....	51
Tabela 21	Resultados experimentais aos 91 dias para o SCC.....	51
Tabela 22	Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 3.....	51
Tabela 23	Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 5.....	51
Tabela 24	Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 6.....	51
Tabela 25	Resultados de relação entre o módulo estático e dinâmico para consistência plástica.....	56
Tabela 26	Resultados de relação entre o módulo estático e dinâmico para auto adensável (scc).....	56
Tabela 27	Dados dos modelos de previsão para idade de 28 dias.....	57
Tabela 28	Correlação dos MEE e MED para concreto plástico em relação a idade de 28 dias.....	59
Tabela 29	Correlação dos MEE e MED para concreto plástico em relação a idade de 28 dias.....	59
Tabela 30	Correlação dos MEE e MED para concreto auto adensável em relação a idade de 28 dias	59
Tabela 31	Correlação dos MEE e MED para concreto auto adensável em relação a idade de 28 dias	59
Tabela 32	Relação dos modelos de previsão analisados com as normas brasileiras	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação esquemática do comportamento tensão - deformação do concreto sob compressão uniaxial. Fonte: Metha e Monteiro (2008).....	22
Figura 2	Figura 2 - Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade. Fonte: Battagin (2008); Benetti (2012).....	23
Figura 3	Interação de fatores que influenciam a resistência do concreto (Fonte: Metha & Monteiro, 2008).....	24
Figura 4	Diagrama ilustrativo de como a microestrutura, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado determina as suas características e afetam as dosagens e propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido (fonte: Metha & Monteiro, 2008).....	25
Figura 5	Comportamento típico tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto - Neville (1997).....	27
Figura 6	Diagrama tensão x deformação do concreto para compressão simples (Fonte: Neville, 1997).....	29
Figura 7	Equipamento e calibração PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating tester).....	32
Figura 8	Equipamento e calibração PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating tester).....	32
Figura 9	Influência do aditivo na hidratação do cimento (Fonte: Basf).....	37
Figura 10	Esquema ilustrativo da redução de água do hiperplastificante (Fonte: Basf).....	38
Figura 11	Diagrama de dosagem – Modelo de comportamento (Fonte: Helene, 1992).	41
Figura 12	Relação entre a resistência e o fator água/ cimento (Fonte: Neville, 1997).....	44
Figura 13	Diagrama de dosagem para resistência à compressão de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte).....	52
Figura 14	Diagrama de dosagem para Módulo de Elasticidade Estático Tangente Inicial de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte).....	53
Figura 15	Diagrama de dosagem para Módulo de Elasticidade Dinâmico de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte).....	53
Figura 16	Análise comparativa ente a resistência à compressão com módulo de elasticidade estático para consistências diferentes.....	54
Figura 17	Análise comparativa ente a resistência à compressão com módulo de elasticidade dinâmico para consistências diferentes.....	55
Figura 18	Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos plástico e auto adensável (respectivamente).....	57
Figura 19	Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos plástico e auto adensável (respectivamente).....	57
Figura 20	Módulo de elasticidade de acordo com o modelo de previsão (28 dias).....	58
Figura 21	Relação entre Resistência à compressão, MEE, MED para $f_{ck} = 20$ Mpa.....	60
Figura 22	Relação entre Resistência à compressão, MEE, MED para $f_{ck} = 30$ Mpa.....	61
Figura 23	Relação entre Resistência à compressão, MEE, MED para $f_{ck} = 20$	61

LISTA DE FOTOS

Foto 1	Mistura do concreto em betoneira de 120 litros.....	45
Foto 2	Medida do espalhamento do scc.....	46
Foto 3	Moldagem de corpos de prova cilíndrico 100 x 200 mm.....	47
Foto 4	Ensaio de Módulo de Elasticidade dinâmico, segundo a ABNT NBR 8522(2008).....	48
Foto 5	Ensaio para verificação da onda ultrassônica no concreto	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
SCC	Concreto Auto Adensável
ARI	Alta Resistência Inicial
CTE	Constante
ACI	American Concrete Institute
ASTM	Standard Specification for Portland Cement
MODEL CODE	Comite Euro Internacional du Beton
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
INT	Instituto Nacional de Tecnologia
ITERS	Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul
E_{ci}	Módulo de Elasticidade Estático
E_d	Módulo de Elasticidade Dinâmico
f_{ck}	Resistência à compressão do concreto
MEE	Módulo de Elasticidade Estático
MED	Módulo de Elasticidade Dinâmico
σ_c	Tensão aplicada
ε_c	Deformação aplicada
C3A	Aluminato tricálcico
MPa	Megapascal

GPa	Gigapascal
C-S-H	Hidratação do cimento
kHz	Quilohertz
α_e	Tipo de agregado graúdo

CABRAL, L.. Análise Comparativa do Módulo de Elasticidade Calculado Segundo Diferentes Normas. Recife, UNICAP. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2014. Dissertação de Mestrado

RESUMO

O trabalho em questão estuda o comportamento e adequação do diagrama de dosagem do concreto com relação ao módulo de elasticidade estático e dinâmico. Além disso, compara os modelos de previsão do módulo de elasticidade estático baseados na resistência à compressão das normas americana, alemã, européia, *fib* e a brasileira ABNT NBR 6118 (2014) - Projeto de Estruturas de Concreto: procedimento. Foram produzidos dois concretos com consistência distintas; uma plástica e outra flúida (auto adensável). Foram desenvolvidos três traços para cada consistência, totalizando assim seis traços. Essas dosagens tiveram como variáveis a relação água/ cimento e o consumo de cimento; o abatimento foi mantido constante. Uma análise comparativa entre os resultados experimentais com os valores previstos por algumas normas foi realizada, avaliando o nível de precisão das mesmas. A ACI 318 (2014) foi a norma que teve seus resultados mais próximos em relação a NBR 6118 (2014). Já as normas EUROCODE –2 e DIN 1045 apresentaram resultados semelhantes. E a norma *fib* CEB – 2010, apresentou valores superestimados em relação às demais normas. Assim, é possível afirmar que a determinação do módulo de elasticidade do concreto se mostrou coerente com os materiais e dosagens utilizadas. Contudo, é uma variável muito sensível à composição do traço, mesmo quando mantidos os mesmos materiais. A resistência à compressão é uma das variáveis que interfere nos resultados. Entretanto, tem também grande influência a variação da natureza dos agregados graúdos e a relação pasta / agregado graúdo, por exemplo. O módulo dinâmico através de ondas ultrassônicas, também foi medido e comparado com o módulo estático, mostrando-se uma opção rápida e não destrutiva de avaliar o módulo de elasticidade do concreto.

Palavras – chaves: *Módulo de elasticidade, resistência à compressão, diagrama de dosagem, modelos de previsão.*

CABRAL, L.. Comparative Analysis of Elastic Modulus Calculated According to Different Standards. Recife, UNICAP. Graduate Program in Civil Engineering, 2014. Master's Dissertation

ABSTRACT

The work involved studying the behavior and adjustment of dosage diagram of concrete with respect to static and dynamic elastic modulus. Furthermore, it compares the models of the static elastic modulus based on the compressive strength, German, European, American and Brazilian ABNT NBR 6118 (2014) prediction - Design of Concrete Structures: procedure. Two concrete were produced with different consistency; plastic and other fluid (self compacting). Three traits were developed for each consistency, totaling six traits. These dosages were as varying the water / cement and cement consumption; the rebate was kept constant. A comparative analysis of the experimental results with those predicted by some standards was carried out to evaluate the level of accuracy of the same. ACI 318 (2014) was the standard that had their closest results compared to NBR 6118 (2014) . Have the Eurocode and DIN 1045 standards -2 showed similar results. And the standard fib CEB - 2010, showed overestimated values in relation to other standards. Thus, we can say that the determination of elasticity of the concrete module proved consistent with the materials and dosages used. However, it is very sensitive to the composition of the trace variable, even when kept the same materials. The compressive strength is one of the variables that affect the results. However, it also has great influence to change the nature of the coarse aggregate and the relative folder / coarse aggregate, for example. The dynamic ultrasonic waves through the module was also measured and compared with the static module, showing a rapid and non-destructive option to evaluate the modulus of elasticity of the concrete.

Key - words: *Modulus of elasticity, compressive strength, dosage diagram, prediction models*

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivo específico	20
1.3	Estruturação da Dissertação	20
2.	MÓDULO de ELASTICIDADE do CONCRETO	21
2.1	Materiais Constitutivos	24
2.1.1	Cimento <i>Portland</i>	24
2.1.2	Agregados	25
2.1.3	Zona de transição	27
2.1.4	Parâmetros de ensaio	28
2.2	Tipos de Módulo de Elasticidade	28
2.2.1	Módulo de Elasticidade Estático (MEE)	28
2.2.2	Módulo de Elasticidade Dinâmico (MED)	29
2.2.3	Estimativa do módulo de elasticidade através de modelos de previsão	32
2.2.3.1	ACI 318 de 2014 - Building Code Requirements for Structural Concrete	33
2.2.3.2	fib Model Code 2010	33
2.2.3.3	ABNT NBR 6118 (2014) - Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento	34
2.2.3.4	Eurocode – 2 (2004) - Design of Concrete Structures PART – 1-1: General Rules and Rules for Building	34
2.2.3.5	DIN 10 45 - Reinforced and Prestressed Concrete Design According	34
3.	EXPERIMENTO	36
3.1	Caracterização dos materiais	36
3.2	Estudo de Dosagem	39
3.3	Descrição dos ensaios	46
4.	Resultados E Discussões	52
4.1	Resistência à compressão	53
4.2	Módulo de elasticidade estático (MEE)	54
4.3	Módulo de elasticidade estático (MED)	55
4.4	Análise do MEE x MED	55
4.5	Análise dos modelos de previsão do módulo de elasticidade	57
4.6	Resistência à compressão, Módulo de Elasticidade Estático tangente inicial, Módulo de Elasticidade Dinâmico	59
5.	Considerações finais	62
5.1	Conclusões propriamente ditas	74
5.2	Sugestões para futuras pesquisas	
5.3	Transferência ao meio	

1. INTRODUÇÃO

Segundo Pinheiro & Santos (2004), na preparação do concreto, com as misturas dos agregados graúdos e miúdos com cimento e água, tem início à reação química de hidratação do cimento com a água, resultando em compostos resistentes denominado concreto. A reação química de hidratação do cimento ocorre com pequena redução de volume e liberação do calor de hidratação podendo dar origem a fissuras e porosidades superiores à porosidade do concreto fresco.

Durante o amassamento do concreto, o gel de cimento hidratado envolve os agregados e endurece com o tempo, formando cristais. Ao endurecer, o gel liga os agregados, resultando um material resistente e monolítico.

A estrutura interna do concreto é heterogênea, pois o cimento hidratado adquire forma de retículos espaciais de gel endurecido que unindo os grãos de agregados graúdo e miúdo de várias formas e dimensões, fica envolvido por grande quantidade de poros e capilares, portadores de água e ar.

Entretanto, fisicamente, o concreto representa um material capilar poroso, no qual se acham presentes os três estados da agregação – sólido líquido e gasoso.

Para se especificar um concreto, normalmente, é utilizada como base a norma ABNT NBR 12655 (2006) – Concreto: Preparo, controle e recebimento - Procedimento na qual é necessário explicitar a resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias e, o módulo de elasticidade a 28 dias de idade ou na idade da desforma e do descimbramento ou, ainda, de outras etapas importantes como a de aplicação da protensão.

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

O concreto, constituído pelos mesmos materiais, apresenta um diagrama tensão deformação desde o início do carregamento, nem sempre linear. Isto pode eventualmente explicar-se pelo fluxo de fluídos nos poros do concreto. Inicialmente é o agregado, mais rígido, que absorve quase todo o carregamento. À medida que o agregado se deforma, ele vai transferindo uma parte de seu carregamento para a pasta de cimento, que começa a deformar-se e até pode começar a se destacar do agregado. A deformação do concreto será sempre intermediária entre as deformações do agregado e da pasta, sendo no início mais próximo da

deformação do agregado, tendendo, depois, para a deformação da pasta. (Vasconcelos, A. & Giammusso, S. 2009)

Conforme Helene (2000), as normas atuais, em grande parte, relacionam o módulo de elasticidade de um concreto com a sua resistência à compressão através de fórmulas matemáticas, devido a uma maior complexidade da determinação do módulo de elasticidade do concreto em relação à determinação de sua resistência à compressão. A grande maioria dos projetos estruturais utiliza um valor para o módulo de elasticidade obtido através de fórmulas matemáticas, tomando como variável a resistência à compressão.

De acordo com Almeida (2012), o módulo de elasticidade é comumente previsto grosseiramente a partir de equações empíricas com base no ensaio de compressão axial. A avaliação do módulo de Young* ou de elasticidade a partir do diagrama tensão deformação se aplicaria apenas a materiais que obedecem à lei de Hooke**, segundo a qual a deformação elástica de um sólido é proporcional à tensão aplicada.

Segundo Coutinho & Gonçalves (1994), a linearidade entre a tensão e a deformação depende da taxa de deformação aplicada ao corpo-de-prova. Quanto mais rápida a velocidade de aplicação de carga, maior será o módulo de elasticidade. Para taxas de velocidade de carga muito lentas, o efeito elástico se superpõe aos de fluência e o módulo tende a diminuir.

Os modelos visco elásticos consideram a constante elástica e a constante de amortecimento do material e são normalmente introduzidos quando a Lei de Hooke não é precisa. Nesses modelos a tensão e a deformação são dependentes do tempo e da frequência. No entanto mesmo no caso de materiais que não obedecem à lei de Hooke, como o concreto, é usual que o módulo seja medido a partir do diagrama tensão deformação específica (Coutinho & Gonçalves, 1994; Mehta & Monteiro, 2008; Neville, 1997).

Segundo Levy (2001) & Benetti (2012), o engenheiro deve ter conhecimento a cerca da referida propriedade, uma vez que ela influi no calculo estrutural. Quando o modulo é bem conhecido, é possível conhecer ou bem prever as deformações e flechas máximas admissíveis, permitindo a determinação dos limites do material, evitando, assim, possíveis problemas como a fissuração do concreto.

Uma segunda possibilidade para determinação experimental do módulo de Young é por meio da realização de ensaios dinâmicos. Atualmente duas técnicas experimentais dinâmicas têm sido muito utilizadas: a da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através do material e a da frequência ressonante. A primeira técnica baseia-se na relação estabelecida por Rayleigh entre a velocidade de propagação do som em determinada amostra

*Módulo de Young – também conhecido como módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona uma medida da rigidez de um material sólido. Ele está associado com a descrição de várias outras propriedades mecânicas, como por exemplo, a tensão de escoamento, a tensão de ruptura, a variação de temperatura crítica para a propagação de trincas sob a ação de choque térmico, etc.

**Lei de Hooke - é a lei da [física](#) relacionada à [elasticidade](#) de corpos, que serve para calcular a [deformação](#) causada pela [força](#) exercida sobre um corpo, tal que a força é igual ao deslocamento da massa a partir do seu ponto de equilíbrio vezes a característica constante do corpo que é deformada.

(material, forma e dimensões), sua massa específica e suas características elásticas (Malhotra e Sivasundaram, 1991).

Para Vasco (2013), tudo o que se falou sobre o módulo de elasticidade se baseia no comportamento linear dos materiais. Isso somente acontece para valores pequenos de tensões aplicadas. A realidade se mostra muito diferente para tensões superiores 50 % das tensões de ruptura. Para o concreto, em particular, a falta de linearidade começa com valores até menores de tensões. Por isso atualmente se prefere falar em “módulo de deformação” e não em “módulo de elasticidade”. O conceito de elasticidade não depende do comportamento linear, se bem que muitas vezes é assim confundido. A elasticidade pressupõe que, cessada a solicitação, a deformação desaparece em qualquer nível de carregamento. O diagrama tensão-deformação pode ser curvo (não linear), mas é descrito pela mesma curva tanto na aplicação das tensões crescentes como decrescentes. Não havendo resíduos com a supressão do carregamento, o material é denominado elástico. Se, além disso, o diagrama for retilíneo, o material é elástico linear. Somente neste caso é que se pode falar de módulo de elasticidade.

Por fim, sabe-se que usualmente avalia-se o módulo de elasticidade de concretos por ensaios de compressão e conseqüente diagrama tensão deformação específica. O presente trabalho experimental trata da análise dos módulos de elasticidade tanto estático como dinâmico de uma série de diferentes concretos de cimento *Portland*.

1.1. JUSTIFICATIVA

Nos dias de hoje, cada vez mais se constrói com mais rapidez, estruturas cada vez mais esbeltas e altas. Em vista disso, não só como a durabilidade, mas as características de projeto passaram a ser um fator importantíssimo. Logo, novas técnicas e materiais estão sendo desenvolvidos para atender todas as características necessárias.

Desta forma, as propriedades mecânicas do concreto são a base para que seja dimensionada uma estrutura de concreto armado. Geralmente, os projetos estruturais são feitos com base na resistência à compressão, sendo esta determinada através de ensaio. Entretanto, para se ter um comportamento mais real do material é preciso entendê-lo melhor, ou seja, conhecer as propriedades da deformação a ser utilizado não só a resistência a compressão mas também o módulo de elasticidade, a retração, a fluência entre outros parâmetros e assim desenvolver um cálculo estrutural mais preciso.

Assim, o módulo de elasticidade foi medido através da ABNT NBR 8522(2008) Concreto. Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama tensão x deformação,

Método de Ensaio. O módulo de elasticidade do concreto é dado pela declividade da curva tensão –deformação sob um carregamento uniaxial.

O módulo de elasticidade é uma das propriedades mecânicas do concreto endurecido além da resistência à compressão e resistência à tração. Essas propriedades são determinadas a partir de ensaios, executados em condições específicas. Geralmente os ensaios são realizados para controle de qualidade e atendimento as especificações.

Uma das fontes expressivas de não conformidade que ocorrem em estruturas de concreto são causados pela não consideração das deformações e dos deslocamentos corretos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é discutir as variáveis que interferem na medida do módulo de elasticidade dos concretos de resistência normal, além de comparar módulos de elasticidade previstos por modelos de reconhecidas normas internacionais.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar ensaio de módulo estático tangente na origem conforme ABNT NBR 8522(2008) – concreto – Determinação do Módulo de Deformação Elástica e Diagrama Tensão x Deformação – Método de Ensaio.
- Realizar estudo bibliográfico das normas ABNT NBR 6118(2014) – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento, ACI 318(2014) – Building Code Requirements for Structural Concrete, Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, *fib* MODEL COD 2010 e DIN 1045 – Reinforced and Prestressed Concrete Design.
- Buscar como é definido o Módulo de Elasticidade Estático entre as normas citadas.
- Comparar o Módulo de Elasticidade Estático com o módulo dinâmico.

1.3. Estruturação da Dissertação

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos descritos a seguir.

O Capítulo 1 introduz o tema da dissertação, apresenta a justificativa assim como os objetivos.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica na qual são apresentados módulo de elasticidade presentes nos textos das principais normas técnicas do planeta.

No Capítulo 3 descreve-se os procedimentos, métodos e materiais utilizados no experimento realizado em laboratório, apresentando-se os resultados obtidos.

O Capítulo 4 é destinado à análise e discussões dos resultados, onde é realizada a transformação dos dados obtidos em informações e, conseqüentemente comparação com as premissas da pesquisa.

O Capítulo 5 trata das conclusões, sugestões para continuidade dos estudos e como esse conhecimento pode ser transferido ao meio técnico.

2. MÓDULO de ELASTICIDADE do CONCRETO

Segundo Neville (1997), o módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young é um parâmetro mecânico que proporciona a medida de rigidez de um material e está associado com as propriedades mecânicas, como tensão de escoamento, tensão de ruptura, temperatura de propagação de fissuras etc. É uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e defeitos (poros e trincas).

Para Andrade W. (1997), o módulo de elasticidade é uma medida da resistência à deformação elástica do material. Embora o concreto não seja verdadeiramente um material elástico, e o gráfico tensão - deformação para incrementos contínuos de carga em geral tem a forma de uma linha com suave curvatura, para fins práticos é considerado linear, dentro do campo das tensões normalmente adotadas.

Conforme Canesso; Correia; Silva; Aguiar; Cetlin (2008) Neville (1997); Metha (2008), o módulo de Young pode ser determinado através de diferentes métodos. No caso de concretos, é usual sua determinação a partir de equações empíricas ou através da determinação da inclinação da curva tensão - deformação no regime elástico, obtida a partir de ensaios de resistência à compressão simples. Ao módulo assim determinado é dado o nome de módulo de elasticidade estático. Nessa determinação, procedimentos especiais devem ser tomados, pois o concreto não é um material que obedece rigidamente a lei de Hooke e é muito sensível a esforços. São, então calculados os módulos tangente e secante a partir das retas traçadas da origem até tensões que variam de 0,5 MPa a 30 - 45% da resistência à compressão simples.

Segundo equipe de Furnas, 1997 apud Santos, Gambale e Andrade (2006), mesmo que o concreto não seja um material verdadeiramente elástico e que o gráfico tensão - deformação para incrementos contínuos de carga, em geral, assumam a forma de uma linha com suave curvatura, para fins práticos este é considerado linear, dentro dos limites das tensões normalmente adotadas. Para que essa linearidade seja respeitada, evitando-se assim microfissurações indesejadas no concreto, várias normas limitam a tensão máxima aplicada baseando-se em um percentual do valor da resistência final do concreto à compressão. A norma brasileira ABNT NBR 8522(2008), por exemplo, limita este valor em 30% da tensão de ruptura.

Para Mehta e Monteiro (2008); Benetti (2012), nem a deformação sob carga instantânea de um corpo-de-prova de concreto é diretamente proporcional a tensão aplicada, nem é totalmente recuperada após o descarregamento. Isto pode ser observado na Figura 1, conforme o estudo de Glucklich (1968).

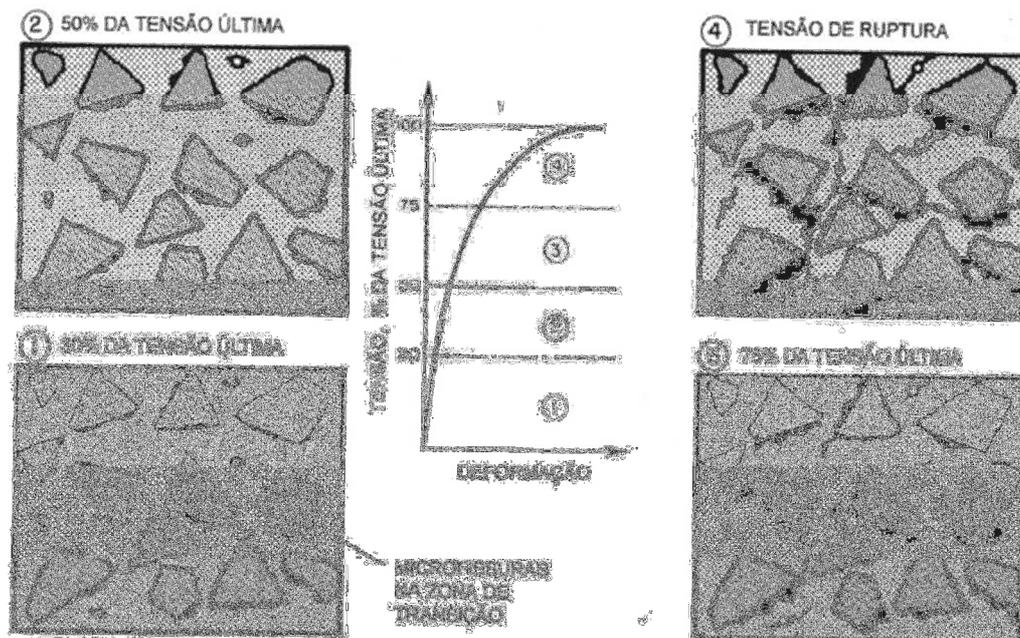


Figura 1 - Representação esquemática do comportamento tensão - deformação do concreto sob compressão uniaxial. Fonte: Mehta e Monteiro (2008)

Antes de o concreto receber a aplicação de uma carga externa, já existem microfissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo. Segundo Mehta & Monteiro (2008); Benetti (2012), em concretos convencionais, estas microfissuras dependem, entre outros fatores, das características de exsudação, da cura do concreto e da resistência da zona de transição. Os autores ainda colocam que devido às diferenças de módulos de deformação, deformações diferenciais surgirão entre a matriz e o agregado graúdo, causando fissuras na zona de transição. No estágio 1 da Figura 1, pode-se observar que a curva tensão - deformação permanece praticamente linear. Isto ocorre porque abaixo de 30% da carga última, as fissuras na zona de transição permanecem praticamente estáveis. Já com aplicação de carga de 50 a 60%, começam a formar-se fissuras na matriz (Mehta & Monteiro, 2008).

Para Melo Neto e Helene (2002), a grande maioria dos projetos estruturais são feitos com base na resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), sem levar em conta as propriedades de deformação do material utilizado, entre outros parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço.

Segundo Cunha (2000), o módulo de elasticidade de um material sólido qualquer, está relacionado com a inclinação da tangente ao diagrama tensão-deformação ($\sigma_c - \epsilon_c$), desse material em um ponto qualquer desse diagrama.

De acordo com Almeida (2012), uma segunda possibilidade para determinação experimental do módulo de Young é por meio da realização de ensaios dinâmicos. Diferentes

técnicas experimentais podem ser utilizadas para a determinação da rigidez dinâmica e/ou obtenção do amortecimento do material, tais como: frequência ressonante, decremento da vibração livre, rotação de vigas, de pulsos e métodos térmicos.

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

Os valores dos módulos de elasticidade utilizados nos cálculos para projetos de concreto são normalmente estimados a partir das expressões empíricas que supõem dependência direta do módulo de elasticidade sobre a resistência e massa específica do concreto. Como primeira aproximação, isso faz sentido porque o comportamento de tensão - deformação dos três componentes do concreto, a saber – agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição na interface – seria, na verdade, determinado pelas suas resistências individuais, que, por sua vez, estão relacionadas à resistência última do concreto (adaptado Metha, 1994).

Em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito (Mehta & Monteiro, 2008). Segundo Shehata (2005), dentre os constituintes do material estudado, os agregados, principalmente os grãos, tem uma grande influência no módulo.

Barbosa e Geyer (2010) colocam que o tipo de agregado grão e o nível de resistência adotada na dosagem do concreto são fatores que definem o resultado do módulo de elasticidade do concreto. Na Figura 2 pode ser observado um diagrama com os principais fatores que afetam o módulo de elasticidade do concreto.

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

Figura 2 - Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade. Fonte: Battagin (2008); Benetti (2012).

2.1. MATERIAIS CONSTITUTIVOS

2.1.1. Cimento *Portland*

De acordo com Castro & Libório; et al (2011), diversos fatores influenciam a reologia de materiais à base cimento, tais como a relação água/cimento, a composição química e o tempo de hidratação do cimento, a reatividade química do filler, a distribuição granulométrica, a massa específica, a textura superficial e a geometria das partículas, as propriedades do aditivo químico, a temperatura e a umidade do meio onde o material é preparado e aplicado, as condições de mistura e o procedimento de ensaio adotado.

Assim, existem diversos fatores a serem considerados, sendo a situação ainda mais complicada pelo fato da existência de interações físico-químicas entre eles. No caso específico do cimento, dentre suas características físicas, a área superficial e a distribuição granulométrica são as mais importantes em termos de fluidez da mistura. Dentre os parâmetros químicos, aqueles que têm exercido maior influência sobre as propriedades das misturas são a perda ao fogo, o teor e a morfologia do C_3A , o teor de álcalis e o tipo de sulfato de cálcio adicionado ao clínquer.

Segundo Metha & Monteiro (2008); o módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento é determinado por sua porosidade. Os fatores que controlam a matriz da pasta de cimento, como a relação água/ cimento, teor de ar, adições minerais e grau de hidratação do cimento estão listados na figura 3. Há relatos de pastas de cimento hidratado com valores de módulo de elasticidade entre 7 e 28 GPa. Deve-se observar que esses valores são semelhantes aos módulos de elasticidade dos agregados leves.

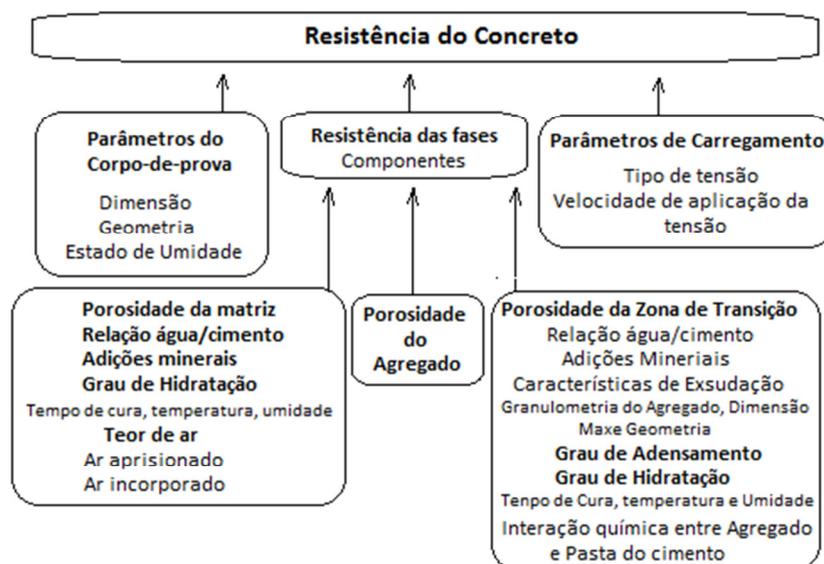


Figura 3 – Interação de fatores que influenciam a resistência do concreto (Fonte: Metha & Monteiro, 2008)

2.1.2. Agregados

Segundo Niemczewski (2014), os agregados são materiais granulares, sem forma e volume definidos. Ocupam de 60 a 80% do volume total do concreto; portanto, sua qualidade é de grande importância para a qualidade final do mesmo. As características dos agregados que mais se destacam para a fabricação do concreto são: porosidade, composição granulométrica, absorção de água, forma e textura superficial das partículas, resistência à compressão, módulo de elasticidade e os tipos de substâncias deletérias presentes. Essas características dos agregados influem nas propriedades do concreto. No estado fresco podem afetar sua coesão, consistência e trabalhabilidade e no estado endurecido a resistência à compressão, estabilidade dimensional, durabilidade, resistência à abrasão e aspecto visual. A figura 4 ilustra as várias inter – relações deixando claro que as características do agregado que são importantes para as propriedades do concreto decorrem da microestrutura da rocha matriz, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado (Metha & Monteiro, 2008, adaptado).

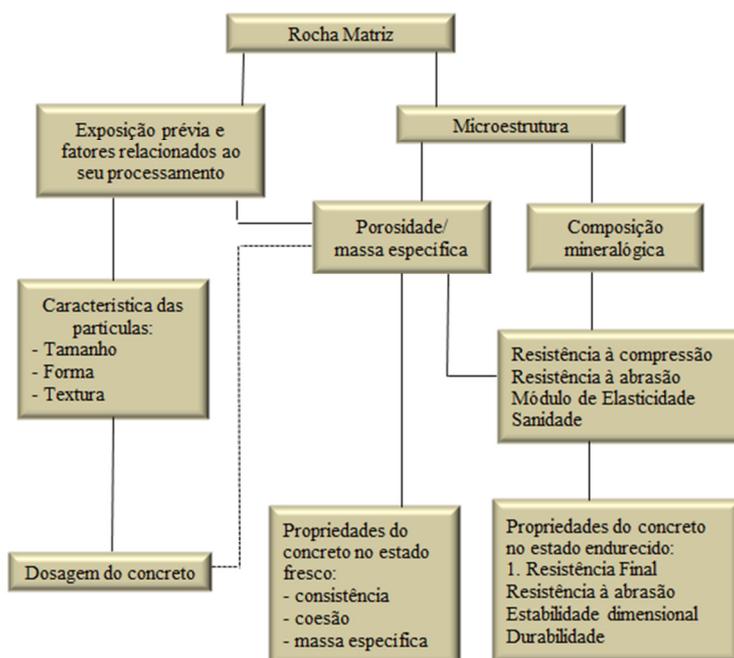


Figura 4– Diagrama ilustrativo de como a microestrutura, condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação do agregado determina as suas características e afetam as dosagens e propriedades do concreto tanto no estado fresco como no estado endurecido (fonte: Metha & Monteiro, 2008)

Uma das características que afetam o módulo de elasticidade do concreto, em relação ao agregado graúdo é a porosidade, considerada mais importante. Ou seja, a porosidade do agregado determina a sua rigidez, que por sua vez, controla a capacidade do agregado de restringir a deformação da matriz. Agregados densos possuem um módulo de elasticidade alto.

Em geral, quanto maior a quantidade de agregados graúdos com alto módulo de elasticidade em uma mistura de concreto, maior será o módulo de elasticidade do concreto. (Metha & Monteiro, 2008). Uma vez que as variações normais na porosidade do agregado não afetam a resistência em concreto de baixa ou média resistência, fica demonstrado que todas as variáveis podem não controlar a resistência e o módulo de elasticidade da mesma forma.

Ainda segundo Metha & Monteiro (2008), ensaios com amostras de rocha demonstram que o módulo de elasticidade de agregados naturais de baixa porosidade, como granito, rochas vulcânicas e basalto, encontra-se na faixa de 70 a 140 GPa, ao passo que, em arenitos, calcários e cascalhos de variedade porosa, pode ser de 21 a 49 GPa. Agregados leves são altamente porosos. Dependendo da porosidade, o módulo de elasticidade de uma agregado leve pode ser de apenas 7 GPa ou chegar a 28 GPa. Em geral, o módulo de elasticidade do concreto com agregado leve varia de 14 a 21 GPa, que está entre 50 a 75% do módulo para concreto de densidade normal com a mesma resistência.

Outras propriedades do agregado também influenciam o módulo de elasticidade do concreto. Por exemplo, dimensão, forma, textura superficial, distribuição granulométrica e composição mineralógica do agregado podem influencia a maior ou menor fissuração na zona de transição na interface e, assim, afetar a forma da curva tensão-deformação.

Além disso, pode-se observar que o módulo de elasticidade do agregado (que controla a capacidade do agregado em restringir alterações de volume na matriz) está diretamente relacionado à sua porosidade, e a medida da massa específica do concreto vem a ser um modo indireto de se obter uma estimativa da porosidade do agregado. A tabela 1 correlaciona o módulo de elasticidade com os tipos de agregados.

Tabela 1 – Tipos de agregados com módulo de elasticidade (Adaptado Metha & Monteiro, 2008)

Tipo de agregado	α_e
Basalto	1,2
Quartzo, granito e gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

A explicação para a influência do agregado no valor do módulo, para concretos considerados normais, está na análise do diagrama tensão - deformação dos diferentes elementos que compõem o concreto, como mostra a figura 5. Enquanto o agregado e a pasta de cimento apresentam relação tensão - deformação praticamente linear, o concreto, não apresenta esta mesma relação, mas uma curvatura. Esta não linearidade, de acordo com Neville (1997), deve-se à presença da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento,

que possui vazios, concentração de cristais de hidróxido de cálcio e microfissuras, fatores esses que afetam o módulo de deformação.

Em materiais heterogêneos como o concreto, os fatores que exercem as maiores influências sobre o comportamento elástico do composto, são o módulo de deformação dos materiais constituintes, suas massas específicas e a zona de transição agregado - pasta (Mehta & Monteiro 1994).

De acordo com Alhadas (2008), o módulo de deformação do agregado e seu conteúdo volumétrico dentro da pasta de concreto determinam o respectivo valor do módulo de deformação. Sabemos que, uma boa graduação dos agregados proporciona menores espessuras nas zonas de transição, devido ao melhor espalhamento dos espaços, tanto pelos agregados bem graduados como pela pasta de cimento.

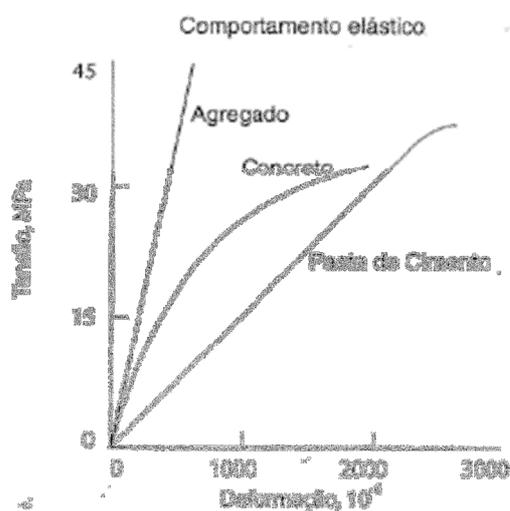


Figura 5 - Comportamento típico tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e concreto - Neville (1997).

A influência do agregado no valor do módulo, geralmente só é percebida em idades mais avançadas, pois nas primeiras idades, a pasta exercerá grande influência sobre o módulo. Com o tempo, a pasta ganha resistência e os esforços são transferidos para os agregados (Alhadas 2008, adaptado).

2.1.3. Zona de transição

Para Mehta & Monteiro (2008), os vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são relativamente mais comuns na zona de transição na interface do que na matriz da pasta; por isso tem um papel importante na determinação das relações

tensão-deformação do concreto. Os fatores que controlam a porosidade da zona de transição na interface estão listados na figura 2.

Há relatos de que a resistência e o módulo de elasticidade do concreto não são influenciados no mesmo grau pelo tempo de cura. Com diferentes dosagens de concreto de resistência variável descobriu-se que em idades mais avançadas (isto é de três meses a um ano), o módulo de elasticidade aumentava com uma taxa mais alta do que a resistência à compressão. É possível que os efeitos benéficos da melhoria da densidade na zona de transição na interface, resultante da lenta interação química entre a pasta de cimento e agregado, seja mais pronunciada para a relação tensão – deformação do que para resistência a compressão do concreto.

2.1.4. Parâmetros de ensaio

De acordo com Metha & Monteiro (2008); Aguilar et al (2006), independentemente das dosagens ou do tempo de cura, corpos-de-prova de concreto que são ensaiados em condições úmidas apresentam módulo de elasticidade cerca de 15% mais alto do que os corpos-de-prova correspondentes ensaiados em condição seca. É importante observar que o inverso ocorre com a resistência à compressão, que é maior quando as amostras estão secas.

Há ainda outra explicação para o fenômeno. Em uma pasta de cimento saturada, a água adsorvida no C-S-H é capaz de suportar a carga e, portanto, sua presença contribui para o módulo de elasticidade; por outro lado, a pressão de separação no C-S-H tende a reduzir a força de tração de Van der Waals*, diminuindo então a resistência do corpo-de-prova úmido (Metha & Monteiro, 2008).

2.2. Tipos de módulos de elasticidade

2.2.1. Módulo de elasticidade Estático (MEE)

Levy (2001); Neto & Helene (2002); Benethi (2012), define módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido como módulo de elasticidade tangente inicial. Do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e 0,3 f_c e ao módulo de elasticidade secante a 0,3 f_c , como se fossem equivalentes.

Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_{ci} , geralmente expresso em GPa. Este valor pode ser obtido pelo método de ensaio brasileiro descrito na ABNT NBR 8522(2008), para carregamento tipo III, que é praticamente equivalente ao valor obtido

Força de Van der Waals – soma de todas as forças atrativas ou repulsivas, que não sejam forças devidas a ligações covalentes entre moléculas (ou entre partes da mesma molécula) ou forças devido à interação eletrostática de íons.

através do carregamento tipo I descrito no mesmo método que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ISO 6784(1982) e na Norma MERCOSUL 05:03-0124 (1997).

Outro tipo de módulo é 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. Este valor pode ser obtido de varias formas, uma delas descritas na ABNT NBR8522 (2008), para carregamento tipo III, que e praticamente equivalente ao valor obtido através do carregamento tipo II descrito no mesmo método, que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ASTM C 469;

Segundo Neto & Helene (2002), 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.

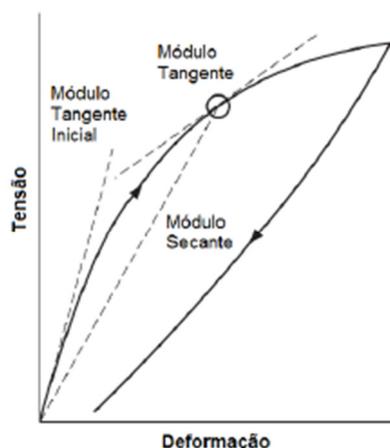


Figura 6 – Diagrama tensão x deformação do concreto para compressão simples (Fonte: Neville, 1997)

A figura 6 apresenta os três tipos de determinações do módulo de elasticidade, sendo a declividade da primeira reta caracterizando a declividade do módulo tangente inicial, a declividade da segunda correspondendo ao módulo secante e a declividade da reta traçada tangente a qualquer ponto da curva tensão - Deformação corresponde ao modulo tangente.

2.2.2. Módulo de elasticidade dinâmico (MED)

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado através de métodos não destrutivos. Malhotra e Sivasundaram, 1991; Andrade, (2012), comenta que atualmente duas técnicas

experimentais dinâmicas têm sido muito utilizadas: a da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através do material (corpos-de-prova de concreto) e a da frequência ressonante. A primeira técnica baseia-se na relação estabelecida por Rayleigh entre a velocidade de propagação do som em determinada amostra (material, forma e dimensões), sua massa específica e suas características elásticas.

O segundo método dinâmico baseia-se na determinação da frequência natural de vibração do elemento a ser analisado quando o mesmo é submetido a vibrações longitudinais ou transversais ou torcionais. Utilizando-se o valor da frequência natural de vibração, conhecendo-se a massa e a geometria do corpo-de-prova, pode-se estimar o módulo de elasticidade dinâmico. (Almeida, 2005, Malhotra e Sivasundaram, 1991; Almeida, 2012).

Para Canesso; Correia; Silva; Aguiar; Cetlin (2008), o módulo através da determinação da frequência natural de vibração do material seria o método alternativo para a determinação da rigidez do concreto na qual a medida seria obtida em ensaios de frequência ressonante. A ressonância é a tendência de um sistema mecânico de absorver mais energia quando a frequência de suas oscilações se iguala a frequência de vibração natural do sistema. O módulo assim obtido está relacionado ao comportamento elástico do concreto já que durante a vibração são aplicadas tensões muito baixas, medindo-se, portanto deformações instantâneas muito pequenas. Esse módulo muitas vezes é chamado de módulo de elasticidade dinâmico, no entanto a palavra “dinâmico” não traduz a realidade física do ensaio, cujo nome mais adequado seria apenas módulo de Young ou de elasticidade.

Segundo Pereira & Rodrigues (2010) e Benetti (2012), as técnicas baseadas nas frequências naturais são mais utilizadas para a caracterização de materiais cerâmicos, frágeis e para caracterização em altas temperaturas, enquanto que a técnica de velocidade sônica é mais utilizada para a caracterização de metais e de concretos de construção civil. A tabela 1 apresenta normas para ensaio de ultrassom e algumas diferenças entre seus procedimentos.

Além dos diversos parâmetros destacados na Tabela 2, é importante salientar que segundo Aguilar et al (2006) a umidade da amostra afeta os resultados do módulo de elasticidade, sendo que em concretos testados úmidos esta propriedade é cerca de 15% maior que nos testados no estado seco. É importante observar que o inverso ocorre com a resistência à compressão, que é maior quando as amostras estão secas.

Segundo Souza (2006), não se poderia aplicar este método para o concreto de modo indiscriminado, por se tratar de um material não homogêneo. Porém, ele afirma que desde que o corpo-de-prova tenha dimensões compatíveis com o tamanho dos agregados, e que seja feito um número adequado de medidas de modo a minimizar a influência da heterogeneidade do

material, tem sido obtidos bons resultados. Por não se tratar de um método destrutivo, podem ser feitas inúmeras medidas no mesmo corpo-de-prova. Também se pode avaliar de forma eficaz a evolução da propriedade com o passar do tempo, e correlacioná-la com a resistência mecânica, sem que os efeitos impostos pela moldagem afetem os resultados.

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

Parâmetro	Normas			
	NM58/1996 ABNT NBR 8802:1994	RILEM NDT1/1972	BS1881: Part 203:1986	ASTM C597/1983
Frequência do ultra-som	Acima de 20KHz	20 a 200 KHz	20 KHz a 150 KHz*	10 KHz a 150 KHz
Superfície	Seca ao ar, limpa, e plana	Plana	Seca ao ar, limpa, e plana	Seca ao ar, limpa, e plana
Área de ensaio para verificar uniformidade de elementos estruturais grandes	1m ²	-	-	-
Distância entre os transdutores	Precisão de ±1%	Precisão de ±1%	Precisão de ±1%	Precisão de 0,5%
Medições de velocidade	Precisão de ±1%		Precisão de ±0,5%	Precisão de 0,5%

Assim, segundo Canesso; Correia; Silva; Aguiar; Cetlin (2008), o módulo dinâmico que corresponde a uma deformação instantânea muito pequena é dado aproximadamente pelo módulo tangente inicial que é o módulo tangente para uma linha traçada a partir da origem. Geralmente é 20, 30 e 40% mais alto que o módulo de elasticidade estático para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

Para Benetti (2012), no Brasil ainda não existe uma norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. Entretanto, a ABNT NBR 8802(1994) prescreve o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de um componente de concreto. Esta norma tem como principais aplicações à verificação da homogeneidade do concreto; a detecção de eventuais falhas internas de concretagem, profundidade de fissuras e outras imperfeições; e o monitoramento de variações no concreto, ao longo do tempo, decorrentes de agressividade do meio (ataque químico), principalmente pela ação de sulfatos. Apesar desta normativa não ter como finalidade obter o módulo de elasticidade do material em estudo, ela auxilia na execução do ensaio.

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

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

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

Onde:

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

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

ν = coeficiente de Poisson, que segundo Callister (2002), é a razão entre a deformação transversal e longitudinal quando um determinado corpo de prova é submetido a uma carga em seu sentido axial. Esse coeficiente pode variar entre 0,10 a 0,20, tendo sido adotado para esta pesquisa o valor de 0,20, mais usual.

No ensaio não destrutivo é obtida através da equação: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ (km/s), onde Δs é a altura de corpo-de-prova (em km); e Δt (em s) é o tempo que a onda se propaga com relação a distancia Δs , que é a altura do corpo de prova, obtida através do equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*), que possui frequência de 54 hz , como ilustra as figuras 7 e 8.



figuras 7 e 8 – Equipamento e calibração PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating tester)

2.2.3. Estimativa do módulo de elasticidade através de modelos de previsão

Atualmente, existem vários modelos de previsão do módulo de elasticidade tangente inicial ou do módulo secante, baseado na resistência à compressão e massa específica do concreto. Poucos modelos levam em conta o tipo de agregado, o que pode acarretar em erros grosseiros de previsão (Neto & Helene, 2002, adaptado). Assim, alguns modelos de previsão do módulo de elasticidade foram selecionados:

2.2.3.1. ACI 318 de 2014 - *Building Code Requirements for Structural Concrete*

A norma americana informa que o módulo de elasticidade secante do concreto é sensível ao módulo do agregado e pode diferir do valor especificado. Com isso, os valores medidos variam usualmente de 120% a 80% em função do tipo de agregado utilizado.

Ainda, segundo a norma, os estudos que levam ao módulo de elasticidade do concreto estão resumidos no item 8.4 (p. 7) com melhor análise da figura R8.4 (p. 8 da norma) onde o módulo é definido a partir da inclinação da linha traçada a partir de uma tensão zero a uma tensão de compressão de $0,45f_c$, para concretos de massa específica normal. A equação 2 exemplifica tal módulo.

2.2.3.2. *fib* Model Code 2010

O módulo de elasticidade é definido como o módulo de elasticidade da tangente na origem do diagrama tensão - deformação. E , é aproximadamente igual à inclinação da secante do ramo carga descarga rápida e não incluem deformações plásticas iniciais. Deve ser utilizado para o diagrama tensão – deformação para compressão uniaxial, tensão uniaxial e multiaxial (*fib* Model Code 2010).

Ainda segundo a norma, mesmo para uma dada força o módulo de elasticidade, depende do tipo de agregado. A equação 3 é válida para concretos feitos com agregados de origem quartzíticas. Para concretos feito de basalto, pedra calcária densa, calcário ou arenito o módulo de elasticidade é dado a partir da equação 3, mas o E_{ci} deve ser multiplicado pelos coeficientes da tabela 3. Os coeficientes devem ser levado em conta em virtude das diferenças de rigidez dos agregados.

Tabela 3 – Efeito do tipo de agregado em relação ao módulo de elasticidade (Fonte: *fib* Model Code, 2010)

Aggregate type	α_e
Basalt, dense limestone aggregates	1,2
Quartzite aggregates	1,0
Limestone aggregates	0,9
Sandstone aggregates	0,7

2.2.3.3. ABNT NBR 6118 (2014) - *Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*

O módulo de elasticidade deve ser obtido segundo ensaio estabelecido na ABNT NBR 8522 (2008), sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial obtido aos 28 dias de idade.

Quando não forem realizados ensaios pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade inicial usando a equação 4 para concretos de 20 a 50 MPa e a Equação 5 para concretos de 55 a 90 MPa.

2.2.3.4. Eurocode – 2 (2004) - *Design of Concrete Structures PART – 1-1: General Rules and Rules for Building*

A norma europeia Eurocode – 2 de 2004 comenta que a deformação elástica do concreto depende fundamentalmente da sua composição (especialmente dos agregados). Os valores dados nesta norma podem ser indicados para aplicações gerais. Porém, esses valores devem ser verificados por ensaios específicos em caso de estruturas especiais. O módulo de elasticidade do concreto é controlado pelo módulo de elasticidade de seus componentes.

Valores aproximados para o módulo de elasticidade E_{cm} , secante entre $\sigma_c = 0$ e $0,4f_{cm}$, para concretos com agregados quartizíticos são dados na Tabela 3.1 da norma (p. 29). Para agregados de rocha calcárea e arenitos os valores devem ser reduzidos em 10% e 30%, respectivamente. Para basalto os valores devem ser aumentados em 20%.

A equação 6, mostrada na tabela 4 representa o cálculo desta norma.

Quando se quer calcular o módulo para qualquer idade a equação 7 é que deve ser utilizada.

2.2.3.5. DIN 10 45 - *Reinforced and Prestressed Concrete Design According*

Para a norma alemã as suas expressões que esclarecem o módulo de elasticidade do concreto é somente para tensões pequenas aplicadas com curta duração.

O carregamento é limitado em relação a resistência média. Ou seja, aplicando-se um carregamento com essa amplitude, e uma velocidade de 5 kg/cm²/s, é possível obter um diagrama sensivelmente linear, na qual se pode extrair um valor constante para o módulo de elasticidade E_c . Os valores que constam da norma alemã se referem exclusivamente à idade de 28 dias e são dados em função da resistência do concreto, determinada em cubos com 20 cm de aresta. Aceitando uma dispersão de ± 20 %. Entretanto a norma ajusta a fórmula (equação 8) para ensaio com amostra cilíndricas.

Usando as expressões utilizadas na tabela 4 é possível calcular o módulo de elasticidade estático do concreto em função do f_{ck} de projeto ou da resistência média esperada através do ensaio à compressão aos j dias de idade num corpo de prova cilíndrico.

Tabela 4 – Expressões para estimativa do módulo de elasticidade segundo modelos de previsão

NORMA	MÓDULO TANGENTE	Observações
ACI 318 -14*	$E_c = \omega_c^{1,5} \cdot 33 \cdot f_c^{1/2} \text{ (MPa)}$ para ω_c entre 1400 e 2500 kg/m ³ $E_c = 57,000 \cdot f_c^{1/2} \text{ (MPa) (Equação 2)}$ para concreto de massa específica normal	E_c = módulo de elasticidade estático secante a 0,45 de f_{ck} , em MPa; f_c = resistência a compressão aos 28 dias, em MPa, obtida de cilindros;
fib MODEL CODE 2010	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$ (Equação 3)	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaisse; $\alpha_E = 0,9$ para calcário e $\alpha_E = 0,7$ para arenito
ABNT NBR 6118:2014	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ (Equação 4)}$ para f_{ck} de 20MPa a 50MPa $E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 1,25}{10} \right)^{1/3}$ (Equação 5) para f_{ck} de 55MPa a 90MPa	
EUROCODE - 2	$E_c = 1,05 \cdot E_{cm} \text{ (Equação 6)}$ $E_c(t) = 1,05 \cdot \left(\exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0,5} \right] \right\} \right)^{0,3} \cdot E_{cm}$ (Equação 7)	Onde $E_{cm} = 22 \cdot ((f_{ck}+8)/10)^{0,3}$
DIN - 1045	$E_c = 6170 \times (f_c)^{1/2} \text{ (Equação 8)}$ para concreto de massa específica normal	

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

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

3. EXPERIMENTO

Para o presente estudo foram desenvolvidas dosagens de concreto tanto para consistência plástica como para o auto adensável (SCC), adotando o método de dosagem proposto pelo IBRACON. Os materiais utilizados foram da Região Metropolitana do Recife - PE. Após a execução dos traços foram feitos ensaios de resistência mecânica e ensaio ultrassônico, com posterior análise de módulo de elasticidade estático e módulo dinâmico.

Para análise dos módulos os seguintes fatores foram analisados a fim de verificar suas influências:

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

3.1. Caracterização dos Materiais

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

- Cimento Portland CP II E 40

O cimento Portland composto, escolhido neste trabalho, tem diversas possibilidades de aplicação. Suas propriedades atendem desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, concreto massa e concreto para pavimentos. O CP II-E-40 leva, em sua composição, adição granulada de escória de alto forno. Este cimento combina com bons resultados o baixo calor de hidratação com o aumento de resistência do Cimento Portland Comum. Recomendado para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos. As características físicas e mecânicas de acordo com a ABNT NBR 11578(1991) – Cimento Portland Composto Especificação, estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Característica física e mecânica do cimento porland composto (CP II E 40)

Ensaio	Resultados	Limites NBR
Finura- Resíduo na peneira 75 μ m	0,9	$\leq 8\%$
Massa específica (g/cm ³)	3,01	*****
Início de Pega (min)	133	$\geq 1h$
Fim de pega (min)	188	$\leq 12 h$
Expansibilidade de Le Chantelier – a Quente (mm)	0,3	$\leq 5 mm$
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	$\leq 10 MPa$
	7 dias	$\leq 20 MPa$
	28 dias	$\leq 32 MPa$

- Agregados

Foi utilizado um agregado miúdo natural, de composição quartzosa, extraído do rio, e seco ao ar.

O agregado graúdo usado para a produção do concreto foi de composição granítica, de acordo com a ABNT NBR 7211(2005). As tabelas 6 e 7 apresentam a caracterização dos mesmos.

- Água

Foi utilizada água potável do abastecimento da Compesa (Companhia Pernambucana de Saneamento).

De acordo com a norma ABNT NBR 15900 (2009), a água de abastecimento público é adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada. Em relação ao teor máximo de cloretos presentes na água de amassamento, a norma limita um valor de 1000 mg/l (Battagin, 2010; Almeida, 2012).

Foi realizada a análise química da água por uma empresa especializada e o diagnóstico foi conduzida de acordo com a metodologia indicada pela norma. O resultado da análise química da água foi de 87,5 mg/l, resultado que se encontra menor que o limite máximo.

- Aditivo

Para o concreto auto adensavel foi utilizado aditivo hiperplastificante. Este aditivo é à base de éter policarboxilato modificado. Devido à sua química diferenciada, consegue resultados bem superiores aos superplastificantes à base de naftaleno e melamina.

Este tipo de aditivo possui uma tecnologia que consiste em um poderoso dispersante que aumenta a eficiência da hidratação do cimento (figura 9). Devido a este efeito dispersante, o aditivo possui uma excepcional capacidade de redução de água (figura 10).



Figura 9 – Influência do aditivo na hidratação do cimento (Fonte: Basf)



Figura 10 – Esquema ilustrativo da redução de água do hiperplastificante (Fonte: Basf)

Por meio das características de sua molécula, o aditivo proporciona ao concreto maior trabalhabilidade que os superplastificantes convencionais, tornando-se ideal para diversas aplicações, como:

- Desenvolvimento de concretos de alto desempenho
- Concretos mais duráveis
- Concretos com baixa retração plástica

Tabela 6 – Característica física da areia

Composição Granulométrica – Percentagem retida em massa		
Peneira ABNT	Individual (%)	Acumulada (%)
6,3	0,0	0,0
4,8	1,0	1,0
2,4	8,0	9,0
1,2	22,0	31,0
0,6	34,0	65,0
0,3	19,0	84,0
0,15		84,0
Fundo	16,0	100
Dimensão máxima característica (mm)		1,18
Módulo de Finura		1,50
Teor de Material Pulverulento (%)		3,50
Massa específica (kg/ dm ³)		2,60
Massa unitária (kg/ dm ³)		1,50

Tabela 7 – Característica física da brita

Composição Granulométrica – Percentagem retida em massa		
Peneira ABNT	Individual (%)	Acumulada (%)
25		
19	1,1	1
12,5	44,9	46
9,5	36,5	82
6,3	14,1	97
4,8	1,2	98
2,4	0,3	98
1,2	0,1	98
0,6	0,1	98
0,3	0,1	98
0,15	0,2	99
Fundo	1,5	100

Dimensão máxima característica (mm)	19,0
Módulo de Finura	6,72
Teor de Material Pulverulento (%)	0,90
Massa específica (kg/ dm ³)	2,72
Massa unitária (kg/ dm ³)	1,45
Absorção (%)	0,5

3.2. Estudo de Dosagem

Segundo Helene (1993), para realizar um estudo de dosagem de concreto é importante conhecer as características dos materiais, pois estes tem grande influência no processo. Além disso, é possível obter as melhores proporções entre os materiais utilizados. Essa proporção ideal entre os materiais característicos do concreto pode ser expressa em massa ou em volume, sendo preferível a proporção mais rígida que é expressa em massa seca.

Existem vários métodos de dosagem de concreto, os mais usais no Brasil são os métodos do IBRACON, INT, ABCP e ITERS. Segundo Tartucé (1989), o método do ACI:

- ✓ A determinação do consumo de cimento a partir do fator água/ cimento e trabalhabilidades conhecidas;
- ✓ A fixação inicial do agregado graúdo com o miúdo.

De acordo com Helene (1998) todo estudo de dosagem parte do pressuposto que o concreto deve ter a capacidade de ser lançado e adensado adequadamente no interior do elemento estrutural.

Ainda segundo o autor, no estudo de dosagem experimental do concreto alguns conceitos são fundamentais:

- a) A caracterização dos materiais componentes do concreto para comprovar se os materiais empregados na elaboração do concreto atendem aos requisitos exigidos nas respectivas normas.
- b) A resistência característica do concreto (f_{ck}), especificação dos requisitos de durabilidade da estrutura e de propriedades especiais do concreto, como:
 - O consumo mínimo de cimento,
 - Relação água/cimento – parâmetro mais importante do concreto estrutural,
 - Módulo de deformação estático mínimo na idade da desforma

- E outras propriedades necessárias à estabilidade e durabilidade da estrutura, durante a fase construtiva e durante a sua vida útil, como prevê as normas ABNT NBR 12655(2006) e ABNT NBR 6118(2007).
- c) Consistência do concreto, medida através do ensaio de abatimento do troco de cone, segundo a ABNT NBR NM 67(1998), em função do elemento estrutural, de acordo com a tabela 8.

Tabela 8 – Escolha da consistência do concreto em função do tipo de elemento estrutural, para adensamento mecânico (Fonte: Helene, 1992)

Elemento estrutural	Abatimento (mm)	
	Pouco armada	Muito armada
Laje	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$
Viga e parede armada	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Pilar do edifício	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 80 \pm 10$
Paredes de fundação, sapatas, tubulões	$\leq 60 \pm 10$	$\leq 70 \pm 10$

- d) Correlações assumidas como “Leis de Comportamento”:

- $f_{cj} = \frac{k_1}{K_2^{a/c}}$ “Lei de Abrams”
- $m = k_3 + k_4 \times a/c \rightarrow$ “Lei de Lyse”
- $C = \frac{1.000}{(k_5 + k_6 \times m)}$ → “Lei de Molinari”
- $\alpha = \frac{(1 + a)}{(1 + m)}$ → “Teor de argamassa seca”
- $m = a + p$

Onde:

f_{cj} = resistência a compressão axial, à idade j, em MPa;

a/c = relação água/ cimento em massa, em kg/kg;

a = relação agregados miúdo seco/ cimento massa seca, em kg/kg;

m = relação agregados secos/ cimento em massa, em kg/kg;

α = teor de argamassa seca; deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

p = relação agregados secos/ cimento em massa, em kg/kg;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 e k_6 constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e aditivos)

e) O modelo de comportamento para dosagem é sintetizado num diagrama, conforme a figura 11.

f) Leis complementares:

- $$C = \frac{\gamma}{1+a+p+a/c}$$
- $$C = \frac{\gamma}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c}$$

Onde:

C = consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado em kg/m^3 ;

γ = massa específica do concreto, medida em kg/m^3 ;

γ_c = massa específica do cimento em kg/dm^3 ;

γ_a = massa específica do agregado miúdo em kg/dm^3 ;

γ_p = massa específica do agregado graúdo em kg/dm^3

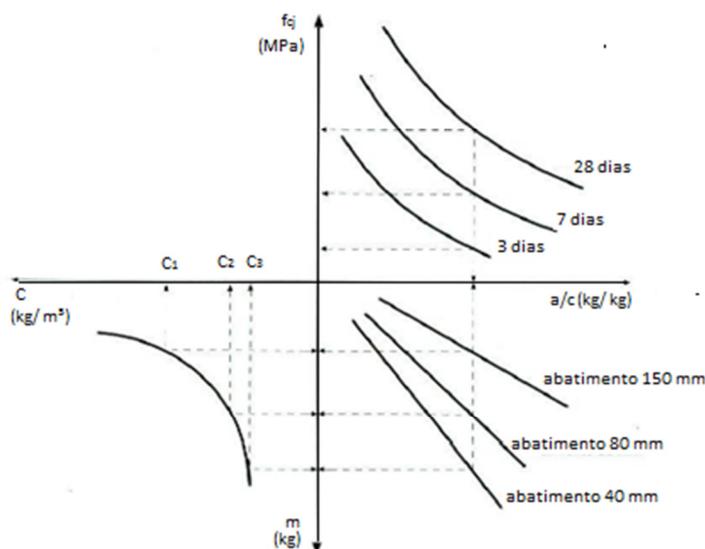


Figura 11 – Diagrama de dosagem – Modelo de comportamento (Fonte: HELENE, 1992).

Segundo Helene (1992), uma das maiores contribuições para o estudo de dosagem dos concretos foi a publicação, em 1918, por Duff A. Abrams, do estudo de inúmeros traços e análise de mais de 50.000 corpos-de-prova enunciando a seguinte lei: dentro do campo dos

concretos plásticos, a resistência aos esforços mecânicos, bem como as demais propriedades do concreto endurecido variam na relação inversa da relação água/ cimento.

Ainda de acordo com Helene (1992), Abrams chegou às mesmas conclusões que Ferét havia chegado há 22 anos, desprezando, porém, o volume de vazios e considerando apenas a relação entre o volume de água e o volume aparente de cimento - para o qual adota a massa unitária fixa de 1.500 kg/m³. Dessa forma propõe o seguinte modelo matemático para expressar a dependência entre as variáveis em questão:

$$F_{cj} = \frac{k_2}{k_3^{a/c}} \quad (\text{Equação 9})$$

3.2.1. Resistência de dosagem

Conforme a ABNT NBR 6118(2007), a resistência de dosagem dos concretos deve atender às condições de variabilidade prevalentes durante a construção. Esta variabilidade medida pelo desvio-padrão Sd (equação 9) é levada em conta no cálculo da resistência de dosagem, segundo a equação:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 * Sd \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

f_{cj} = a resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em MPa;

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão, em MPa;

Sd é o desvio-padrão da dosagem, em MPa.

Para se definir desvio padrão de dosagem “ Sd ”, pode ser adotado “subjetivamente, segundo Helene (1992) quando não se conhecem pelo menos 30 resultados da obra em questão, como sendo:

$Sdj = 3 \text{ MPa}$, sempre que a produção for em massa, com controle rigoroso de umidade dos agregados e com equipe bem treinada;

$Sdj = 4 \text{ MPa}$, sempre que a produção for em volume, com controle rigoroso de umidade dos agregados e com equipe bem treinada;

$Sdj = 5,5 \text{ MPa}$, sempre que a produção for em volume, e com equipe nova em fase de adaptação.

3.2.1.1. Cálculo da relação água/ cimento

A determinação da relação água/ cimento é muito importante pois esta afeta diretamente a resistência do concreto. Helene desenvolveu um estudo a nível nacional para vários tipos de cimentos existentes.

A correlação entre a relação água/ cimento e a resistência a compressão estão nas figuras 3,4 e 5 onde são apresentadas as curvas médias obtidas para as idades de 3, 7, 28, 63, 91 dias.

3.2.1.2. Cálculo da dosagem

O diagrama experimental de dosagem é montado a partir de três pontos na qual correlaciona resistência a compressão, relação água/ cimento, traço e consumo de cimento.

A partir de uma dosagem preliminar 1:5,0 (cimento:agregados totais secos), misturada em betoneira obtem-se mais dois traços definidos, geralmente, em 1:3,5 (traço rico) e 1:6,5 (traço pobre).

3.2.1.2.1. Determinação do teor ideal de argamassa para a dosagem preliminar

Esta etapa é uma das mais importantes, pois o teor de argamassa é um fator determinante de lançamento e uniformidade do concreto. A falta deste pode ocasionar bicheiras e porosidade. Já o excesso pode ocasionar fissuração por origem térmica e por retração de secagem. Assim para um concreto com boas características o melhor é o determinar o teor ideal.

A partir da dosagem preliminar adiciona-se sucessivamente argamassa (cimento e areia) e água no traço até definir o teor ideal. Essa é verificada na dosagem através do abatimento do tronco de cone. Vale salientar que a quantidade de agregado graúdo não varia.

Segundo Helene (1992), o teor final depende ainda de um fator externo que a a possibilidade da perda de argamassa no processo de transporte e lançamento (principalmente a quantidade retida na forma e armadura, e quando se utiliza bica de madeira). Este valor em processos usuais pode ser estimado em 2% a 4% de perdas.

A partir dos dados de tensão e deformação obtidos nos ensaios de compressão simples dos concretos é possível construir um gráfico com os seus resultados, e a curva resultante é chamada de diagrama tensão-deformação.

Esse diagrama é muito importante na engenharia civil, porque através dele obtêm-se os dados da resistência à compressão de um material independente das dimensões ou forma, isto é, da sua geometria. O diagrama tensão deformação dos concretos, numa determinada idade,

depende da composição dos materiais constituintes das amostras e da proporção entre eles, assim como das características dos corpos de prova, como as imperfeições microscópicas e a forma como foi fabricado. Dependem também dos métodos de ensaios usados, como a velocidade da aplicação da carga e a temperatura durante o experimento.

A resistência do concreto à compressão é influenciada por uma complexa rede de inúmeras variáveis, tais como: granulometria, resistência dos agregados, tipo de cimento, relação água/cimento, tipo de sollicitação, velocidade do carregamento, idade do concreto, formas e dimensões do corpo de prova, dentre outras.

Quando o concreto está plenamente adensado, a resistência é inversamente proporcional à relação água/cimento. A curva que representa este princípio é chamada de “curva de Abrams”, como mostra a Figura 12.

A resistência mecânica do concreto é diretamente proporcional à sua porosidade, e por ser porosa, a zona de transição torna-se mais fraca que a matriz de cimento hidratado. A porosidade é determinada pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação. Os cimentos CP V ARI hidratam mais rapidamente que os cimentos CP I (comum) sob as mesmas condições de cura. Os concretos contendo cimento CP V com pouca idade de hidratação tem menor porosidade e uma matriz mais resistente do que os concretos confeccionados com CPI.

As velocidades de hidratação e desenvolvimento da resistência dos cimentos CP III e CP IV são mais lentos do que o cimento CP I e a influência da composição desses cimentos sobre a porosidade da matriz e a resistência do concreto fica limitada às baixas idades.

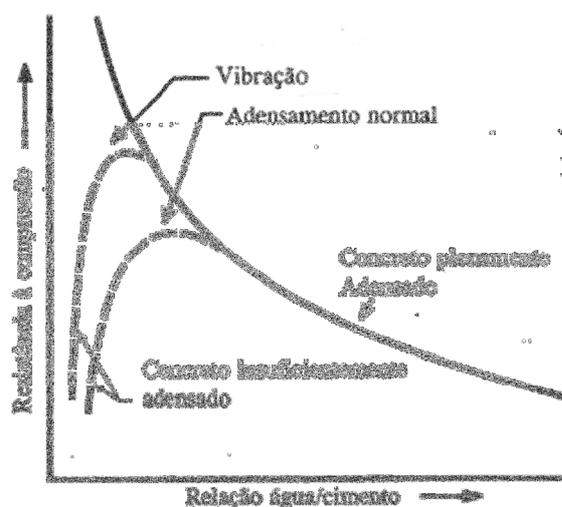


Figura 12 – Relação entre a resistência e o fator água/ cimento (Fonte: Neville, 1997)

O método de dosagem utilizado para o desenvolvimento dos traços foi do IBRACON. Todos os materiais empregados na confecção de todos os traços foram dosados em peso com o auxílio de uma balança digital e misturados numa betoneira com capacidade nominal de 120 litros.

As misturas das dosagens de concreto plástico (foto 1) foram feitas de modo a obter 3 traços. Inicialmente, foi dosado o traço 1:5 a fim de se descobrir a argamassa ideal, fixando o abatimento do tronco de cone em $100 + 20$ mm. Após, foram dosadas mais 2 misturas variando o a/c e fixando o abatimento de acordo com a ABNT NBR NM 67(1998). A tabela 9 mostra todos os traços produzidos.

Depois, foram desenvolvidos as dosagens para o concreto auto adensável (scc), também 3 traços. Primeiramente, foi dosado o traço 1:5 para descobrir a argamassa ideal, fixando o espalhamento em $650 + 50$ mm (foto 2). Por fim, foram dosadas mais 2 misturas variando o a/c e fixando o espalhamento de acordo com a ABNT NBR 15823-2(2010). A tabela 10 mostra os traços confeccionados.

Para todos os traços de concreto plástico, o teor de argamassa (cimento + areia)/(cimento+areia+brita) foi mantido constante em 50%. Contudo, admitindo a perda de argamassa de 2%, a argamassa utilizada, considerada constante, foi de 52%. Os corpos de prova foram curados até o último ensaio de 91 dias.

Para todos os traços de concreto auto adensável, o teor de argamassa (cimento + areia)/(cimento+areia+brita) foi mantido constante em 61%. Contudo, admitindo a perda de argamassa de 2%, a argamassa utilizada, considerada constante, foi de 63%. Os corpos de prova foram curados até o último ensaio de 91 dias.



Foto 1 – Mistura do concreto em betoneira de 120 litros



Foto 2 – Medida do espalhamento do SCC

Tabela 9 – Dosagem dos traços de concreto plástico

Traços de Concretos Frescos			
Componentes	Traço 1	Traço 2	Traço 3
Cimento (kg/m ³)	536	357	303
Areia (kg/m ³)	579	758	801
Brita (kg/m ³)	1029	1029	1019
Água (kg/m ³)	241	218	227
a/c (kg/kg)	0,45	0,60	0,75
m (kg/kg)	3	5	6
Slump (mm)	100	100	105
Peso específico (g/cm ³)	2,384	2,362	2,350
Traço unitário em massa	1,0 : 1,08 : 1,92	1,0 : 2,12: 2,88	1,0 : 2,64 : 3,36

Tabela 10 – Dosagem dos traços de concreto auto adensável (SCC)

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

3.3. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

O estudo foi realizado com os materiais – cimento areia, brita e água para as seguintes análises:

- *Moldagem de corpos-de-prova – ABNT NBR 5738(2003)*

Para cada traço de concreto foram moldado 20 corpos-de-prova cilíndricos 100 x 200 mm (foto 3).



Foto 3 – Moldagem de corpos de prova cilíndrico 100 x 200 mm

- *Resistência à compressão – ABNT NBR 5739(2007)*

Para cada traço de concreto foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples, em prensa com capacidade para 100 toneladas, de 5 corpos de prova, para cada idade de 3, 7, 28 e 91 dias, com as tolerâncias de tempo.

- *Módulo de elasticidade estático – ABNT NBR 8522(2008)*

Para cada traço e idade foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade estático, onde através dos dados de tensão de ruptura à compressão pode-se calcular o percentual de carga última para determinação do módulo de elasticidade. Para esse trabalho foi utilizada a determinação através do Módulo Tangente Inicial (foto 4).

Para atender a esta especificação, foi aplicado um plano de carga variando de 0,5 MPa até 30% da carga última, sendo utilizados 3 corpos de prova irmãos, seguindo a recomendação da ABNT NBR 8522(2003).

A prensa possui um sistema de controle de carga aplicada, possibilitando uma maior precisão e facilidade na leitura das deformações.

- *Cura dos corpos de prova – ABNT NBR 5738(2003) e ABNT NBR 9479(2006)*

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

- *Ensaio de ultrassom – ABNT NBR 8802(2013)*

O ensaio de ultrassom verifica a uniformidade do concreto e complementa o ensaio de módulo dinâmico.

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

▪ *Ensaio de Módulo dinâmico*

Foi adotado o método da norma britânica BS – 1881 part 203(1986), que descreve o procedimento similar ao da norma brasileira ABNT NBR15630(2008).



Foto 4 – Ensaio de Módulo de Elasticidade estático, segundo a ABNT NBR 8522: (2008)



Foto 5 – Ensaio para verificação do módulo de elasticidade dinâmico direta no concreto

Os resultados obtidos para a resistência á compressão e os módulos de elasticidade estático tangente inicial e dinâmico estão apresentados nas tabelas 11, 12, 13 e 14, para concreto plástico e 18, 19, 20 e 21 para concreto auto adensável.

As tabelas 15, 16 e 17 contemplam um resumo com todas as idades estudadas de resistência a compressão, módulo estático e módulo dinâmico para cada traço de concreto plástico.

Tabela 11 – Resultados experimentais aos 3 dias para o concreto plástico

Traços	1	2	3
f_{c3} (MPa)	29,7	20,8	10,8
E_{ci3} (GPa)	25,3	21,5	16,7
E_{d3} (GPa)	39,8	37,6	33,4
Velocidade (km/s)	2,17	2,15	2,01
Coeficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Slump (mm)	100	100	105
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (kg/m ³)	2,338	2,325	2,308
Consumo de cimento (kg/m ³)	693	456	389

Tabela 12 – Resultados experimentais aos 7 dias para o concreto plástico

Traços	1	2	3
f_{c7} (MPa)	34,9	25,5	14,6
E_{ci7} (GPa)	27,7	24,6	19,0
E_{d7} (GPa)	41,2	39,4	35,1
Velocidade (km/s)	2,21	2,14	2,03
Coeficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Slump (mm)	100	100	105
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (kg/m ³)	2,338	2,325	2,308
Consumo de cimento (kg/m ³)	693	456	389

Tabela 13 – Resultados experimentais aos 28 dias para o concreto plástico

Traços	1	2	3
f_{c28} (MPa)	41,0	33,5	20,0
E_{ci28} (GPa)	30,1	27,8	23,6
E_{d28} (GPa)	44,7	42,8	39,3
Velocidade (km/s)	2,30	2,29	2,26
Coeficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Slump (mm)	100	100	105
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (kg/m ³)	2,338	2,325	2,308
Consumo de cimento (kg/m ³)	693	456	389

Tabela 14 – Resultados experimentais aos 91 dias para o concreto plástico

Traços	1	2	3
f_{c91} (MPa)	50,0	37,3	23,4
E_{ci91} (GPa)	32,2	30,2	27,1
E_{d91} (GPa)	48,2	46,4	43,7

Velocidade (km/s)	2,40	2,36	2,30
Coeficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Slump (mm)	100	100	105
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (kg/m ³)	2,338	2,325	2,308
Consumo de cimento (kg/m ³)	693	456	389

Tabela 15 – Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 3

Idades	3	7	28	91
f _{ci} (MPa)	29,7	34,9	41,0	50,0
E _{ci} (GPa)	25,3	27,7	30,1	32,2
E _d (GPa)	39,8	41,2	44,7	48,2

Tabela 16 – Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 5

Idades	3	7	28	91
f _{ci} (MPa)	20,8	25,5	33,5	37,3
E _{ci} (GPa)	21,5	24,6	27,8	30,2
E _d (GPa)	37,6	39,4	42,8	46,4

Tabela 17 – Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o concreto plástico m = 6

Idades	3	7	28	91
f _{ci} (MPa)	10,8	14,6	20,0	23,4
E _{ci} (GPa)	16,7	19,0	23,6	27,1
E _d (GPa)	33,4	35,1	39,3	43,7

Tabela 18 - Resultados experimentais aos 3 dias para o SCC

Traços	1	2	3
f _{c3} (MPa)	29,2	18,4	9,7
E _{ci3} (GPa)	22,9	19,0	16,7
E _d (GPa)	35,1	33,7	28,6
Velocidade (km/s)	2,07	2,05	1,91
Coeficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Espalhamento (mm)	650	650	690
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (g/cm ³)	2,283	2,230	2,185
Consumo de cimento (kg/m ³)	689	454	387

Tabela 19 - Resultados experimentais aos 7 dias para o SCC

Traços	1	2	3
f _{c7} (MPa)	34,6	24,9	12,6
E _{ci7} (GPa)	24,2	22,2	17,5
E _{d7} (GPa)	39,0	37,3	32,2
Velocidade (km/s)	2,07	2,05	1,91
Coeficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Espalhamento (mm)	650	650	690
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (g/cm ³)	2,283	2,230	2,185
Consumo de cimento (kg/m ³)	689	454	387

Tabela 20 - Resultados experimentais aos 28 dias para o SCC

Traços	1	2	3
f_{c28} (MPa)	42,7	32,0	18,1
E_{ci28} (GPa)	26,8	24,7	20,5
E_{d28} (GPa)	41,6	39,9	35,1
Velocidade (km/s)	2,07	2,05	1,91
Coefficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Espalhamento (mm)	650	650	690
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (g/cm ³)	2,283	2,230	2,185
Consumo de cimento (kg/m ³)	689	454	387

Tabela 21 - Resultados experimentais aos 91 dias para o SCC

Traços	1	2	3
f_{c91} (MPa)	47,7	35,6	20,5
E_{ci91} (GPa)	29,8	26,2	23,4
E_{d91} (GPa)	43,7	41,1	37,5
Velocidade (km/s)	2,07	2,05	1,91
Coefficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2
a/c (kg/kg)	0,45	0,61	0,75
Espalhamento (mm)	650	650	690
m (kg/kg)	3	5	6
Massa específica (g/cm ³)	2,283	2,230	2,185
Consumo de cimento (kg/m ³)	689	454	387

As tabelas 22, 23 e 24 contemplam um resumo com todas as idades estudadas de resistência a compressão, módulo estático e módulo dinâmico para cada traço de concreto auto adensável.

Tabela 22 – Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o SCC m = 3

Idades	3	7	28	91
f_{cj} (MPa)	29,2	34,6	42,7	47,7
E_{cij} (GPa)	22,9	24,2	26,8	29,8
E_{dj} (GPa)	35,1	39,0	41,6	43,7

Tabela 23 – Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o SCC m = 5

Idades	3	7	28	91
f_{cj} (MPa)	18,40	24,9	32,0	35,6
E_{cij} (GPa)	19,0	22,2	24,7	26,2
E_{dj} (GPa)	33,7	33,7	39,9	41,1

Tabela 24 – Resumo nas idades de 3,7,28 e 91 dias para o SCC m = 6

Idades	3	7	28	91
f_{cj} (MPa)	9,70	12,6	18,1	20,5
E_{cij} (GPa)	16,7	17,5	20,5	23,4
E_{dj} (GPa)	28,6	32,2	35,1	37,5

4. RESULTADOS E DISCUSSOES

Segundo ANDRADE (1997), quando se aplica uma carga de compressão num determinado corpo-de-prova de concreto, produz-se uma deformação proporcional à tensão aplicada, dentro do limite elástico, conforme a Lei de Hooke. A relação entre o incremento da tensão e o incremento de deformação é a chamada módulo de elasticidade “E”.

Com isso, é possível afirmar que os concretos muito resistentes têm maior inclinação na origem da curva tensão - deformação. Por outro lado, os concretos menos resistentes rompem com deformações maiores, apresentando assim maior capacidade de acomodação plástica.

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

De acordo com os resultados obtidos foram feitos diagramas de dosagem, tanto para resistência à compressão como para módulo de elasticidade tangente inicial e dinâmico, segundo Monteiro & Helene (1993). Estes são apresentados com suas respectivas equações de Lei de ABRAMS, Lei de LYSE e Lei de MOLINARI obtidas através da regressão linear, como demonstram as figuras 17, 18, 19.

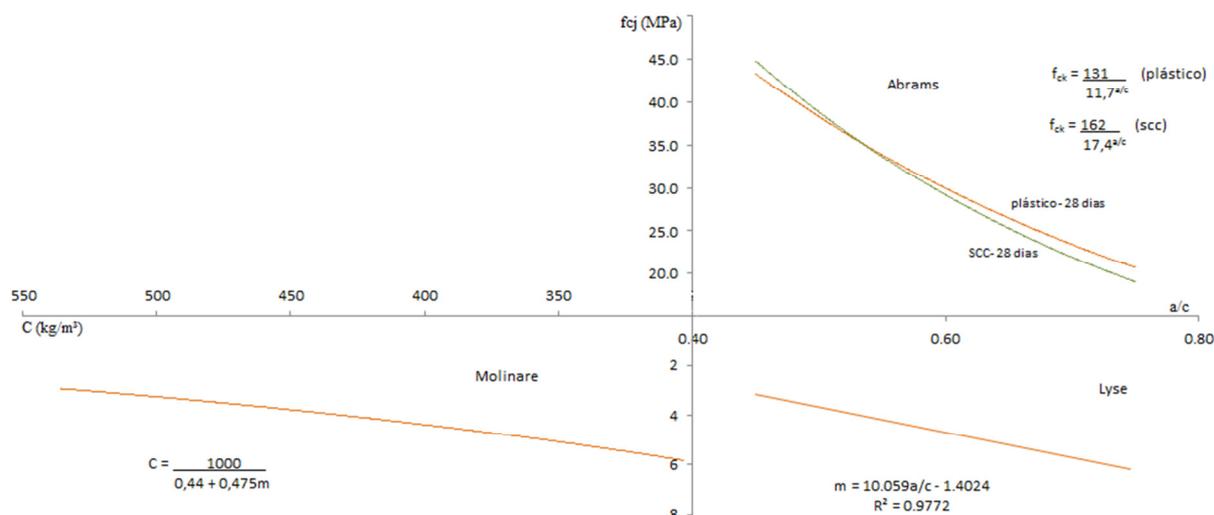


Figura 13 – Diagrama de dosagem para resistência a compressão de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte)

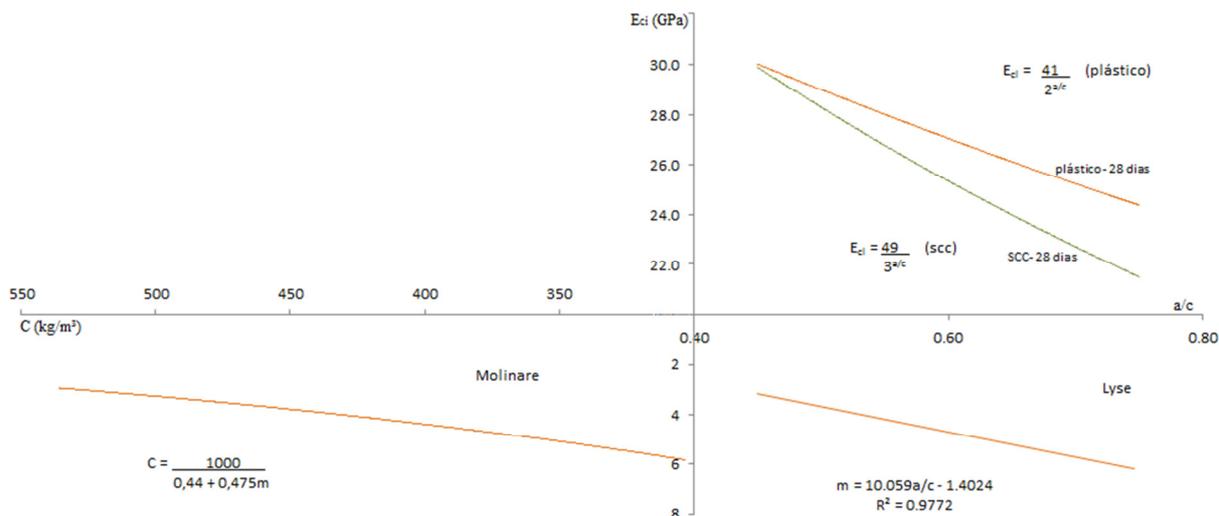


Figura 14 – Diagrama de dosagem para Módulo de Elasticidade Estático Tangente Inicial de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte)

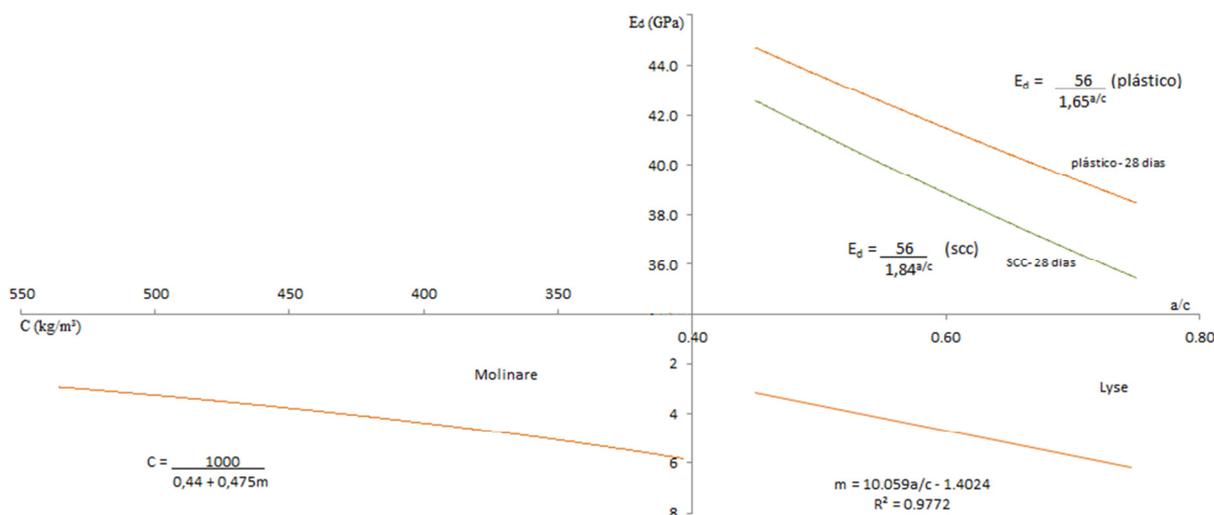


Figura 15 – Diagrama de dosagem para Módulo de Elasticidade Dinâmico de concreto plástico e auto adensável (abatimento = cte)

4.1. Resistência à compressão

A figura 13 apresenta o diagram de dosagem, ao avaliar o primeiro quadrante é possível caracterizar a Lei de Abrams, na qual esta lei determina que para uma mesmo grau de hidratação da pasta de cimento a resistência da pasta depende essencialmente da relação água/cimento.

Dessa forma, o estudo foi feito para dois tipos de consistência de concreto, um plástico e outro auto adensável, com os mesmos materiais de mesma natureza, podendo-se concluir,

segundo esta lei que independente da consistência a relação água/cimento é inversamente proporcional a resistência à compressão.

Esta verificação é aceitável, pois segundo Helene (1992), em 1931, Inge Lyse publicou sua contribuição ao estudo da dosagem dos concretos, demonstrando que dentro de certos limites é possível considerar a massa de água por unidade de volume de concreto como a principal determinante da consistência do concreto fresco, qualquer que seja a proporção dos demais materiais da mistura. Essa verdade se verifica sempre que sejam mantidos materiais de mesma natureza, com grãos de mesma forma, textura e dimensão característica.

4.2. Módulo de elasticidade estático (MEE)

Em análise a figura 14, primeiro quadrante, verifica-se o comportamento do módulo de elasticidade tangente inicial a origem do concreto. Para este tipo de análise vários fatores interferem, o primeiro deles é a consistência. Além desse tem-se também a quantidade de agregado, tipo e quantidade de cimento, interface pasta agregado, parâmetros de ensaio.

Obteve-se maiores resultados de módulo de elasticidade estático para o concreto de consistência plástica. É fácil de explicar, pois a quantidade de pasta presente no concreto plástico é razoavelmente menor se comparando ao scc.

A figura 16 abaixo acrescenta e confirma tal análise. Como está se avaliando consistências diferentes, os resultados de resistência à compressão terão valores distintos assim como os de MEE.

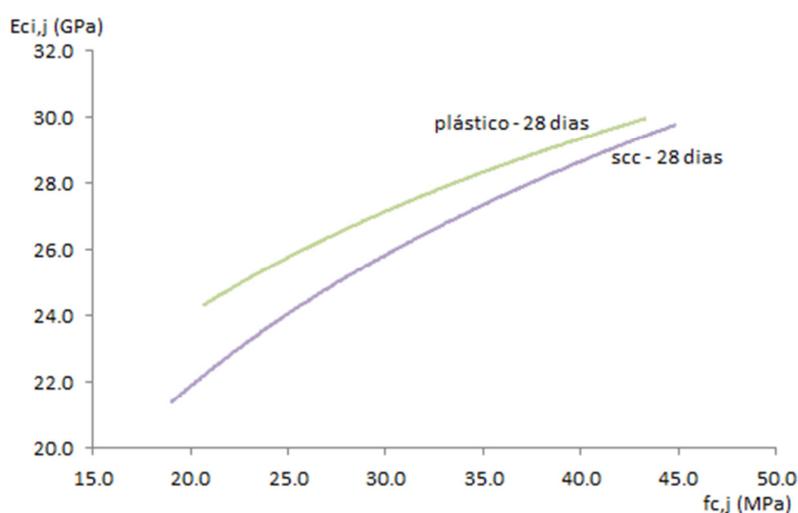


Figura 16 – análise comparativa entre a resistência à compressão com módulo de elasticidade estático para consistências diferentes.

4.3. Módulo de elasticidade Dinâmico (MED)

Por fim, a figura 15 representa a análise do módulo de elasticidade dinâmico, que em parte tem suas conclusões parecidas com o módulo de elasticidade estático, no tocante à consistência.

A figura 17 acrescenta e confirma tal análise. Como está se avaliando consistências diferentes, os resultados de resistência à compressão terão valores distintos assim como os de MED.

Contudo, para obtenção do valor dos módulos vale considerar que tem suas vantagens e desvantagens. A determinação do módulo de elasticidade estático apresenta desvantagens devido à interferência do aparato de ensaio nos resultados. O extensômetro pode se desprender devido a fissuras no corpo-de-prova, a medição do deslocamento pode estar considerando inclusive a deformabilidade do capeamento, e pode ocorrer a influência do efeito do confinamento causado pela máquina nos topos da amostra. Além do mais, certos aspectos da curva da tensão deformação não são devidos às propriedades intrínsecas do concreto, mas às propriedades do equipamento de ensaio, que assim poderiam influenciar as medidas realizadas (Canesso; Corrêa; Silva; Aguilar; Cetlin (2008), adaptado).

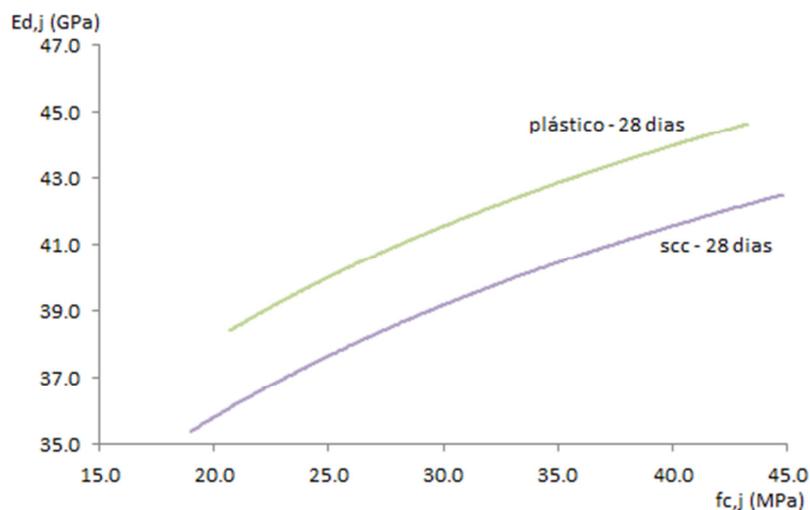


Figura 17 – análise comparativa ente a resistência à compressão com módulo de elasticidade dinâmico para consistências diferentes

4.4. análise do MEE x MED

De acordo com o trabalho é possível analisar que a relação entre MEE com MED pode ser de 0,6 aumentando até 0,8 com o crescimento da resistência independente da consistência do concreto. As tabelas 25 e 26 exemplificam melhor este comportamento.

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

Tabela 25 – Resultados de relação entre o módulo estático e dinâmico para consistência plástica

CONSISTÊNCIA PLÁSTICA								
a/c	fc	NBR 6118-2014	NBR 8522-2008	Ed	Ec/Ed (6118)	Ec/Ed (8522)	MEDIA (Ec 6118/Ed)	MEDIA (Ec 8522/Ed)
0,45	39.3	35.1		46.6	0.8		0.8	0.7
	40.0	35.4		45.3	0.8			
	38.8	34.9	30.4	44.9	0.8	0.7		
	45.5	37.8	29.7	43.7	0.9	0.7		
	41.3	36.0	30.3	43.1	0.8	0.7		
0,6	34.7	33.0		43.6	0.8	0.0	0.7	0.6
	33.3	32.3		43.6	0.7	0.0		
	32.8	32.1	28.2	44.0	0.7	0.6		
	32.1	31.7	26.2	44.2	0.7	0.6		
	34.4	32.8	28.9	43.7	0.8	0.7		
0,75	21.0	25.7		44.1	0.6	0.0	0.6	0.5
	18.6	24.1		42.5	0.6	0.0		
	20.1	25.1	24.0	45.6	0.6	0.5		
	19.8	24.9	23.7	40.1	0.6	0.6		
	20.4	25.3	23.2	39.3	0.6	0.6		

Tabela 26 – Resultados de relação entre o módulo estático e dinâmico para auto adensável (scc)

SCC								
a/c	fc	NBR 6118-2014	NBR 8522-2008	Ed	Ec/Ed (6118)	Ec/Ed (8522)	MEDIA (Ec 6118/Ed)	MEDIA (Ec 8522/Ed)
0,45	43.8	37.1		40.0	0.9		0.9	0.6
	44.5	37.3		40.2	0.9			
	44.5	37.3	25.6	40.4	0.9	0.6		
	39.3	35.1	26.2	39.9	0.9	0.7		
	41.7	36.2	25.6	40.2	0.9	0.6		
0,6	27.3	29.2		38.1	0.8		0.8	0.7
	34.3	32.8		39.1	0.8			
	32.8	32.1	25.4	37.6	0.9	0.7		
	33.6	32.5	25.9	39.5	0.8	0.7		
	32.1	31.7	22.8	40.0	0.8	0.6		
0,75	18.0	23.7		37.3	0.6		0.6	0.6
	19.1	24.5		36.6	0.7			
	18.0	23.8	23.7	37.9	0.6	0.6		
	17.7	23.6	14.8	36.1	0.7	0.4		
	17.9	23.7	23.1	36.5	0.6	0.6		

Segundo as especificações técnicas PUNDIT (1998); GUIMARÃES, C. (2006), fatores de correlação entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico é de 1,5, ou seja, se o valor do módulo estático é 22 MPa o módulo dinâmico corresponde está próximo a 32 MPa. Nas figuras 18 e 19 é possível verificar a correlação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico.

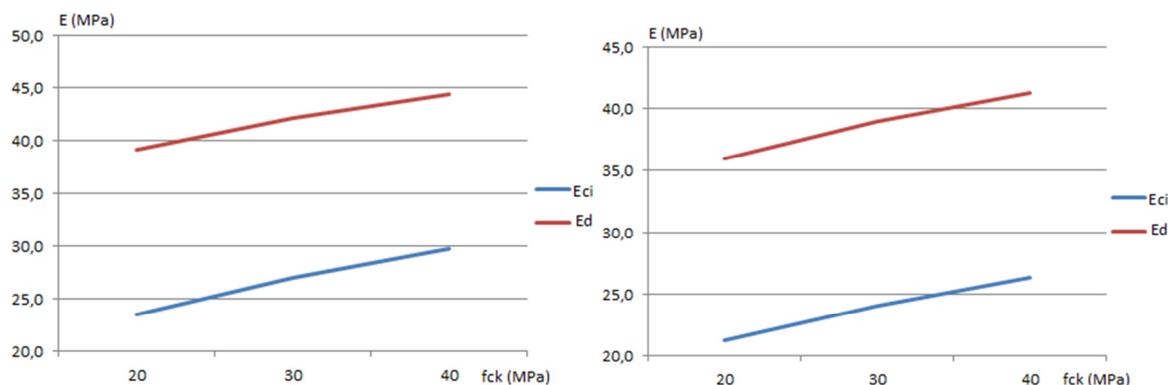


Figura 18 e 19 – Comparação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico dos concretos plástico e auto adensável (respectivamente)

4.5. análise dos modelos de previsão dos módulos de elasticidade

No decorrer do trabalho foram estudados diversos modelos de previsão do módulo de elasticidade apresentados tanto em normas nacionais como em estrangeiras. Estes modelos têm o propósito de economizar o tempo consumido na execução deste ensaio, através da estimativa do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão.

A tabela 27 demonstra os resultados calculados pelos modelos de previsão para 28 dias. Vale salientar que esses modelos de previsão são feitos para concretos normais não para concretos de alto desempenho.

Para melhor análise, os dados da tabela 27 foram colocados em formato de gráfico, onde foram traçadas curvas do modelo de previsão junto com a curva dos dados experimentais. Este gráfico comparativo está representado na figura 20.

Tabela 27 – Dados dos modelos de previsão para idade de 28 dias

MÓDULO DE ELASTICIDADE							
<i>fck</i>	NBR 8522 – 2008 (plástico)	NBR 8522 – 2008 (sc)	ACI 318 - 2014	<i>fib</i> MODEL COD - 2010	Eurocode -2 - 2004	DIN 1045	NBR 6118 - 2014
20,0	23,5	21,2		58,5	32,4		25,0
26,6			29,4			31,8	
30,0	27,0	24,1		66,6	35,9		30,7

36,6			34,5			37,3	
40,0	29,8	26,3		73,1	38,8		35,4
46,6			38,9			42,1	

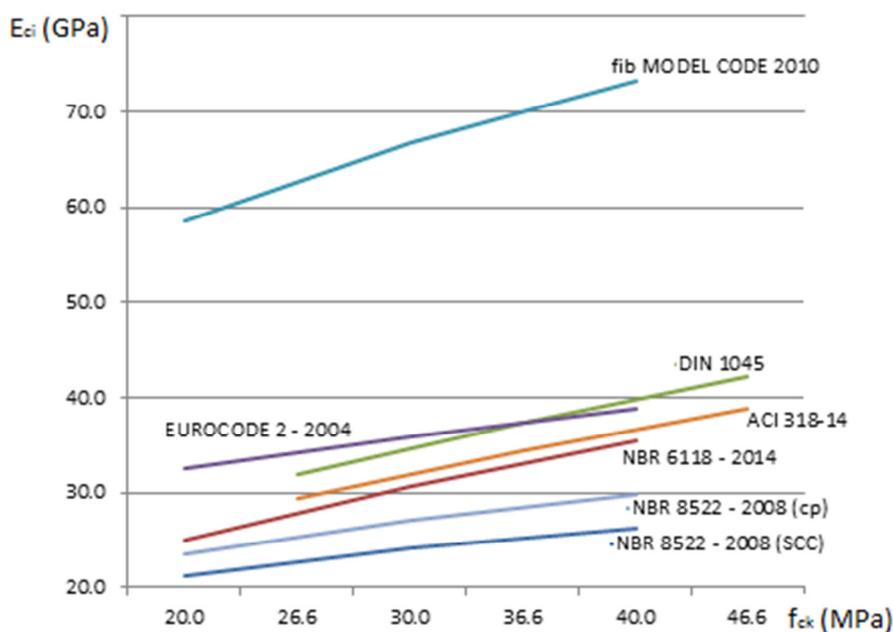


Figura 20 – Módulo de elasticidade de acordo com o modelo de previsão (28 dias)

- Como era de se esperar, o módulo de elasticidade estático varia de acordo com a mudança da consistência. Logo, a figura 20 demonstra que os resultados da NBR 8522(2008) para consistência auto adensável foi menor em relação aos valores do concreto de consistência plástica para NBR 8522(2008).
- Comparando os resultados das normas brasileiras, verifica-se que os valores obtidos na NBR 6118(2014), superestimam os da norma NBR 8522(2008). Dessa forma, ao se comparar a relação destas duas normas conclui-se que a 8522 para scc é 0,8 e para plástico é 0,9.
- As normas Eurocode – 2 (2004) e DIN 1045 possuem características muito parecidas. Contudo, seus valores estão superestimados em relação a NBR 8522(2008). A relação entre a Eurocode -2 e NBR 8522 para scc e concreto plástico é de 0,7 e 0,8, respectivamente. Assim como para a norma alemã a relação é de 0,6 e 0,7.
- A norma americana ACI 318(2014) está com seus resultados superestimados em relação as normas brasileiras. Entretanto, comparando com demais modelos de previsão de estudos os valores são menores. A relação entre a norma americana com a 8522 para scc, 8522 para concreto plástico e 6118(2014) é 0,7, 0,8, 0,9 respectivamente.

- A *fib* Model Code 2010 está com seus valores superestimados em relação a todos os modelos de previsão estudados. Desta forma, seus resultados não são muito confiáveis. A relação entre a *fib* com a 8522 para scc, 8522 para concreto plástico e 6118(2014) é 0,4 para 8522 independentemente a consistência e 0,5 para 6118.

Por fim, ao analisar a relação dos módulos nas idades propostas pelo trabalho, 3, 7, 28 e 91 tomando como base de referência a idade de 28 dias, os valores deste estudo são encontrados nas tabelas 28 e 29 para concreto plástico e nas tabelas 30 e 31 para concreto auto adensável.

Os resultados indicam que a medida que há uma aumento de resistência com o passar das idades, o módulo tendem a se estabilizar.

Tabela 28 e 29 – Correlação dos MEE e MED para concreto plástico em relação a idade de 28 dias

Relação E_{ci} - concreto plástico				Relação E_d - concreto plástico			
F_{ck}	20	30	40	F_{ck}	20	30	40
<u>3</u>	0,91	0,94	0,95	<u>3</u>	0,95	0,95	0,95
<u>7</u>	0,93	0,97	0,99	<u>7</u>	0,95	0,95	0,99
28	1,00	1,00	1,00	28	1,00	1,00	1,00
91	1,11	1,06	1,03	91	1,09	1,07	1,05

Tabela 30 e 31 – Correlação dos MEE e MED para concreto auto adensável em relação a idade de 28 dias

Relação E_{ci} - SCC				Relação E_d - SCC			
F_{ck}	20	30	40	F_{ck}	20	30	40
<u>3</u>	0,95	0,94	0,94	<u>3</u>	0,92	0,92	0,91
<u>7</u>	0,96	0,97	0,97	<u>7</u>	0,98	0,98	0,98
28	1,00	1,00	1,00	28	1,00	1,00	1,00
91	1,08	1,07	1,06	91	1,03	1,03	1,02

4.6. Resistência à compressão, Módulo de Elasticidade Estático tangente inicial, Módulo de Elasticidade Dinâmico

A análise das figuras 21, 22 e 23 abaixo indicam que a relação água/cimento vai diminuindo, os módulos de elasticidade estático e dinâmico mantem a mesma relação que já foi discutida no decorrer do trabalho.

Uma relação praticamente constante entre os módulos estático e dinâmico indicam que os dois módulos descrevem fisicamente o fenômeno de endurecimento do concreto. Isto indicaria, confirmando o prescrito pela referência bibliográfica do trabalho, que o método indicado para materiais homogêneos e isotrópicos se aplica ao concreto. O módulo determinado por frequência ressonante poderia ser utilizado com vantagens para determinação da rigidez do concreto, pois é um ensaio simples, mais preciso na medida em que envolve menos variáveis, é não destrutivo e permite avaliar a qualidade da moldagem do corpo de prova.

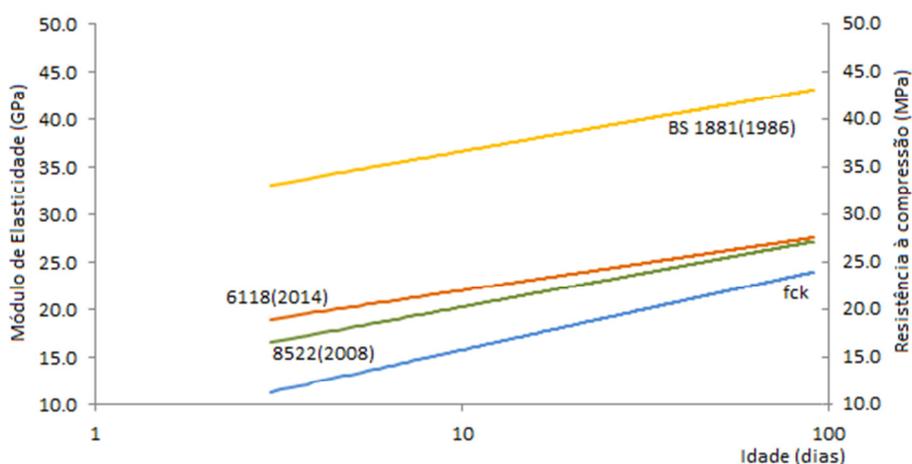


Figura 21 – Relação entre Resistência à compressão, MEE, MED para fck = 20 MPa

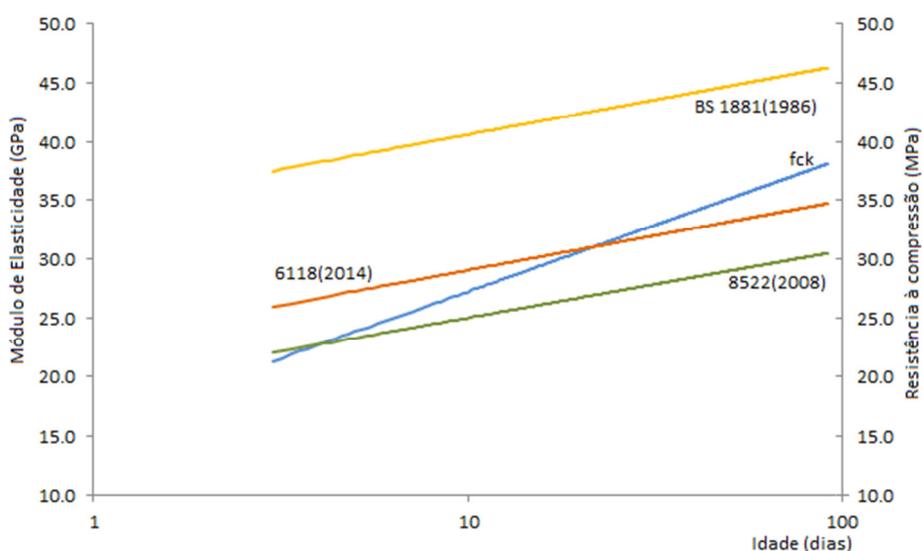


Figura 22 – Relação entre Resistência à compressão, MEE, MED para fck = 30 MPa

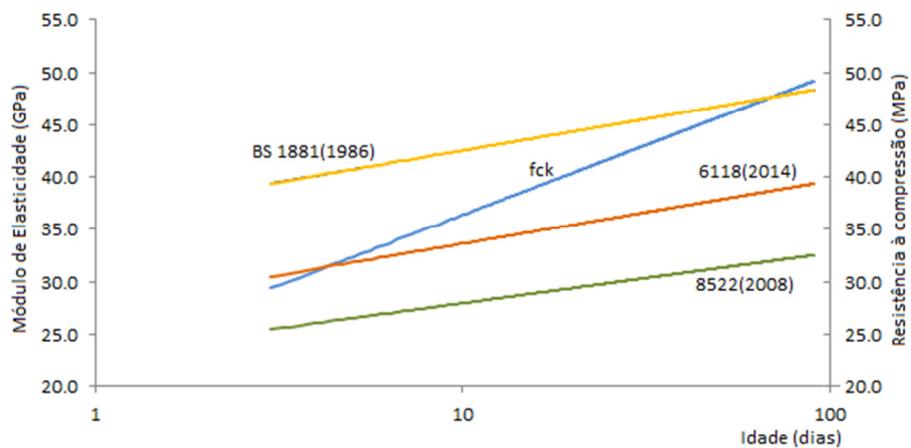


Figura 23 – Relação entre Resistência à compressão, MEE, MED para $f_{ck} = 30$ MPa

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões propriamente dita

A partir da revisão bibliográfica e do estudo experimental realizado para esta pesquisa é possível concluir:

- ✓ Para mesmos materiais e uma mesma relação água/cimento, em massa, para diferentes consistência do concreto fresco e diferentes consumo de materiais por m³, a resistência à compressão mantem-se igual;
- ✓ O Módulo de elasticidade, ao contrário, varia segundo a consistência do concreto fresco mesmo que os concretos sejam produzidos com mesmos materiais e mesma relação a/c;
- ✓ O módulo de elasticidade estático tangente inicial a origem, assim como o módulo dinâmico, foram sempre maiores para o concreto de consistência plástica em comparação ao concreto auto-adensável;
- ✓ A correlação encontrada neste trabalho de 1,5 entre o módulo de elasticidade estático tangente à origem e o módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom concorda com a bibliografia PUNDIT (1998); GUIMARÃES, C. (2006);
- ✓ O módulo de elasticidade do concreto é uma variável bem menos sensível ao grau de hidratação do cimento (crescimento com a idade) que a resistência à compressão, ou seja, em todos os casos o módulo cresce sempre menos que a resistência à compressão, com a idade;
- ✓ Todos os modelos de previsão do módulo de elasticidade do concreto apresentados pelas diferentes normas estudadas: ABNT NBR 6118(2003); ABNT NBR 6118(2014); ACI 318; EUROCODE; fib Model Code, mostraram-se inadequados e sempre acima dos valores experimentais, indicando que essas referências de norma não devem ser adotadas indiscriminadamente como parâmetro de controle ou como índice a ser exigido dos concretos em obra;
- ✓ A Tabela 32 apresenta um resumo simplificado dessa divergência entre modêos de norma e valores experimentais:

Tabela 32 – Relação dos modelos de previsão analisados com as normas brasileiras

Relação modelos de previsão	Percentual
6118(2014)/8522 (scc)	20%
6118(2014)/8522 (plástico)	10%
Eurocode – 2/ 8522 (scc)	30%
Eurocode – 2/ 8522 (plástico)	20%
Eurocode – 2/ 6118(2014)	10%
Din 1045/ 8522 (scc)	40%
Din 1045/ 8522 (plástico)	30%

Din 1045/ 6118(2014)	20%
ACI (2014)/ 6118 (2014)	10%
ACI (2014)/ 8522 (plástico)	20%
ACI (2014)/ 8522 (sc)	30%
Fib MODEL COD(2010)/8522(sc)	60%
Fib MODEL COD(2010)/8522(plástico)	60%
Fib MODEL COD(2010)/ 6118 (2014)	50%

5.2. Continuidade dos estudos

No término desta pesquisa, surgiram alguns questionamentos, segue abaixo algumas sugestões para continuidade dos trabalhos:

- Estudar módulos de elasticidade estático e dinâmico para concretos de 50MPa a 100MPa conforme previsto na nova ABNT NBR 6118:2014;
- Identificar a influência de outros parâmetros tais como natureza petrográfica dos agregados nos módulos estático e dinâmico.

5.3. Transferência ao meio

Os resultados desta pesquisa serão transferidos ao meio técnico e à sociedade através de publicações de artigos em congressos e revistas especializadas, cursos, palestras e principalmente sugestões de adequação da norma ABNT NBR 6118:2014, a serem enviadas ao CB 2 da ABNT.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova – NBR 5738. Rio de Janeiro,2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da resistência à compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto – NBR 5739. Rio de Janeiro,2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados para concretos - especificação – NBR 7211. Rio de Janeiro,2009;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – Método de ensaio – NBR NM 6467. Rio de Janeiro,2006;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Elástico e Diagrama Tensão x Deformação – NBR 8522. Rio de Janeiro,2008;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto endurecido – Determinação da Velocidade de Propagação de ondas ultrassônica – NBR 8802. Rio de Janeiro,2013;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e Concreto – Câmaras úmidas e tanques para cura dos corpos de prova – NBR 9479. Rio de Janeiro,2006;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica – NBR NM 248. Rio de Janeiro,2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Amostragem – NBR NM 26. Rio de Janeiro,2009;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Redução da Amostra de Campo para ensaio em laboratório – NBR NM 27. Rio de Janeiro,2001;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo – Determinação das Impurezas orgânicas – NBR NM 49. Rio de Janeiro,2001;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente – NBR NM 52. Rio de Janeiro,2009;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água – NBR NM 53. Rio de Janeiro,2009;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado — Índice de desempenho de agregado miúdo contendo impurezas orgânicas — Método de ensaio – NBR NM 7221. Rio de Janeiro,2012;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis – NBR NM 7218. Rio de Janeiro,2010;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira de 75µm, por lavagem – NBR NM 46. Rio de Janeiro,2003;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado – Reatividade Álcali - agregado – NBR 15577. Rio de Janeiro,2008;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento – NBR NM 12655. Rio de Janeiro,2006;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação da Consistência pelo abatimento do tronco de cone – NBR NM 67. Rio de Janeiro,1998;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto Auto Adensável. Parte-1: Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco – NBR 15823-1. Rio de Janeiro,2010;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica – NBR 15630. Rio de Janeiro,2008;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto e execução de obras de concreto armado – NBR 6118. Rio de Janeiro,2007.

ABNT NBR 9917 - Agregados para concreto- Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis, 2009

BRITISH STANDARD ASSOCIATION. **BS 1881 Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.**1986.

HARTMANN, C.; HELENE, P. HPC in Brazilian Office Tower. **Concrete International. ACI**, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68, 2003.

NETO, A; HELENE, P. R. **Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade do Concreto.** In: IBRACON 44º Congresso Brasileiro do Concreto.

METHA, P.; MONTEIRO, P. Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3º edição, Ed Ibracon. 2006.

ISAIA, G. Concreto – Ensino, Pesquisa e Realização. Vol 1 e 2. Ed Ibracon. 2005.

Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem – ABESC. Informe técnico, 2011.

CANOVAS, M. F. Patologia e Terapia do Concreto Armado – Coordenação técnica L. A . Falcão Bauer, São Paulo, PINI, 1988;

HIBBELER, R.C., Structural Analysis Structural, 2002.

GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS C.A., Ensaios dos Materiais, Rio de Janeiro, LTC, 2000;

ISAIA, E.G.C., Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, São Paulo, IBRACON, 2v, 2005;

ISAIA, E.G.C., Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, São Paulo, IBRACON, 1v, 2005;

Manual Técnico de Produtos Sika, 2007;

NEVILLE, M. A ., Propriedades do Concreto, São Paulo, 2º edição, PINI, 1997;

PETRUCCI, E. G.R., Concreto de Cimento Portland, São Paulo, 14º edição, Globo, 2005;

ALMEIDA, M.A., Análise do Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico do Concreto de Cimento Portland através de ensaios de Compressão Simples e de frequência ressonante, Belo Horizonte, 2012;

Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP Model Code 1990. London, Thomas Telford, 1993.

EUROCODE -2 Design of concrete structures – Part 1 – 1: General rules and rules for building, 2004.

ACI – 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete, 1995;

DIN – 1045, Reinforced and Prestressed Concret Design, 2013.

HELENE, Paulo R.L.; MONTEIRO, Paulo J.M. Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. Materials and Structures, v.26, n.162, Oct. 1993 p.443-452.

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.

VASCONCELOS, Augusto C.; GIAMUSSO, Salvador E. O Misterioso Módulo de Elasticidade. Site: <http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89-artigos/199-o-misterioso-modulo-de-elasticidade?pop=1&tmpl=component>. 2009.

GUIMARÃES, C., AVALIAÇÃO DO USO DA ÁGUA MAGNETIZADA NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS EM CENTRAIS. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da UFMG, 2006.

CASTRO, A., LIBÓRIO, A., PANDOLFELLI, V., A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. 2011.

CUNHA, J.C.da, “Módulo de Elasticidade do Concreto” – Informador das Construções, Ed.1424, Belo Horizonte - MG, julho 2000.

ALHADAS, M., Estudo da Influência do Agregado Graúdo de Diferentes Origens Mineralógicas nas Propriedades Mecânicas do Concreto. Dissertação apresentada ao Curso de Pós- Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil, 2008.