

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

YGOR VIEIRA MACHADO

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS COM 18 ANOS
DE IDADE**

Goiânia, GO
2019

Ygor Vieira Machado

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS COM 18 ANOS
DE IDADE**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Campus Goiânia, como parte dos
requisitos necessários para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Civil**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Francinete
Silva Jr.**

**Goiânia, GO
2019**

11491a Machado, Ygor Vieira.

Avaliação do módulo de elasticidade em concretos com 18 anos de idade / Ygor Vieira Machado. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.
74f.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Francinete Silva Jr.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Inclui apêndice.

1. Concreto. 2. Módulo de deformação. I. Silva Jr., Paulo Francinete (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 620.136

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Ygor Vieira Machado

Matrícula: 20151011050314

Título do Trabalho: Avaliação do módulo de deformação em concretos com 18 anos de idade.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Local

Goiânia, 14/12/2019.

Data

Ygor Vieira Machado

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

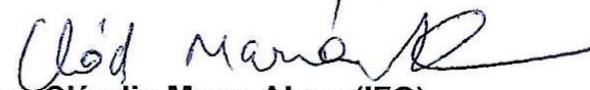
Ygor Vieira Machado

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS COM 18 ANOS
DE IDADE**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de
Engenharia Civil, do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Goiás, Campus Goiânia, como parte dos
requisitos necessários para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Civil**

Aprovado em 12 de dezembro de 2019:


Prof. Dr. Paulo Francinete Silva Jr. (IFG)
(Orientador)


Prof. Msc. Cláudio Marra Alves (IFG)


Prof Msc. Glydson Ribeiro Antonelli (IFG)

Goiânia, GO
2019

RESUMO

AVALIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CONCRETOS COM 18 ANOS DE IDADE

AUTOR: Ygor Vieira Machado

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Francinete Silva Jr.

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo devido, principalmente, à sua grande versatilidade, aliada a boas propriedades físicas, com tanto uso, a melhora dessas propriedades é objeto de diversas pesquisas. O módulo de deformação é uma propriedade que foi negligenciada por muito tempo, mas problemas com deformações lentas e a possibilidade de execução de maiores vãos devido a melhora da resistência à compressão do concreto, mais atenção foi direcionada a esta propriedade. Para melhor previsão do módulo de deformação do concreto nos projetos é necessário conhecer o comportamento desta propriedade nos diferentes tipos de concreto. Neste trabalho é estudada a influência do tipo mineralógico de agregado graúdo, da relação água/cimento, do abatimento e da idade no módulo de deformação. Foram analisados concretos confeccionados com basalto, calcário e seixo rolado; com relação água/cimento de 0,35, 0,50 e 0,70; abatimento de 20 mm, 110 mm, e 200 mm; analisados nas idades de 7 dias, 28 dias, 91 dias, 413 dias e a última aos 18 anos de idade. Os concretos confeccionados com basalto obtiveram os melhores resultados de módulo de deformação, seguidos dos de calcário e de seixo, sendo a variável mais significativa. Os concretos com menor relação água/cimento obtiveram melhores resultados. O abatimento não se mostrou muito significativo, com pouca variação entre os traços. A evolução do módulo foi observada até os 413 dias, mas aos 18 anos os resultados obtidos foram inferiores ao esperado, provavelmente devido à degradação por armazenamento indevido.

Palavras-chave: Concreto, módulo de deformação, agregado graúdo, idade avançada.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE MODULUS OF ELASTICITY IN 18 YEAR OLD CONCRETE

AUTHOR: Ygor Vieira Machado
ADVISOR: Prof. Dr. Paulo Francinete Silva Jr.

Concrete is the most widely used building material in the world due mainly to its great versatility, combined with good physical properties, with such use, the improvement of these properties is the subject of several studies. The modulus of elasticity is a property that has been neglected for a long time, but problems with slow deformations and the possibility of larger spans due to improved compressive strength of concrete, more attention has been directed to this property. To better predict the concrete modulus of elasticity in the projects it is necessary to know the behavior of this property in the different types of concrete. In this work the influence of mineralogical type of coarse aggregate, water / cement ratio, slump and age on the modulus of elasticity is studied. Concrete made with basalt, limestone and rolled pebble was analyzed; with water / cement ratio of 0.35, 0.50 and 0.70; slump of 20 mm, 110 mm and 200 mm; analyzed at 7 days, 28 days, 91 days, 413 days and the last at 18 years of age. The concretes made with basalt obtained the best results of modulus, followed by limestone and pebble, being the most significant variable. Concrete with lower water / cement ratio had better results. The slump was not very significant, with little variation between the mixes. The evolution of the modulus was observed until 413 days, but at 18 years the results were lower than expected, probably due to degradation due to improper storage.

Keywords: Concrete, modulus of elasticity, coarse aggregate, late age.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Notícia sobre problemas causados por deformações lentas.....	13
Figura 2.1 –	Representação esquemática do módulo de deformação tangente inicial (Eci).....	17
Figura 2.2 –	Representação esquemática do módulo de deformação secante (Ecs).	18
Figura 2.3 –	Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.....	19
Figura 2.4 –	Relação entre módulo de elasticidade e idade para diferentes tipos de agregado.....	20
Figura 2.5 –	Efeito isolado da idade sobre o módulo de deformação do concreto.	23
Figura 2.6 –	Valores de módulo de deformação estimados pela NBR 6118 para diferentes resistências à compressão.	25
Figura 3.1 –	Famílias de concreto obtidas pela combinação das variáveis	28
Figura 3.2 –	Agregados graúdos utilizados na confecção dos concretos.	30
Figura 3.3 –	Corpos de prova utilizados nos ensaios.....	31
Figura 3.4 –	Esquema de operação do Esclerômetro de Reflexão Schmidt.	34
Figura 3.5 –	Curva de equivalência entre índice esclerométrico e resistência à compressão.....	35
Figura 3.6 –	Corpo de prova preparado para ensaio de dureza superficial por esclerometria.....	36
Figura 4.1 –	Módulo de deformação para concretos com $a/c = 0,35$	41
Figura 4.2 –	Módulo de deformação para concretos com $a/c = 0,50$	42
Figura 4.3 –	Módulo de deformação para concretos com $a/c = 0,70$	42
Figura 4.4 –	Resistência à compressão de concretos com fator $a/c = 0,50$	43
Figura 4.5 –	Módulo de deformação de concretos aos 7 dias de idade.	44
Figura 4.6 –	Módulo de deformação de concretos aos 28 dias de idade.	44
Figura 4.7 –	Módulo de deformação de concretos aos 91 dias de idade.	45
Figura 4.8 –	Módulo de deformação de concretos aos 413 dias de idade.	45
Figura 4.9 –	Módulo de deformação de concretos aos 18 anos de idade.....	46
Figura 4.10 –	Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,35$	47
Figura 4.11 –	Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,50$	47
Figura 4.12 –	Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,70$	48
Figura 4.13 –	Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,50$	49

Figura 4.14 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com basalto.....	50
Figura 4.15 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com calcário.	50
Figura 4.16 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com seixo.	51
Figura 4.17 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com basalto e $\alpha_E = 1,1$	52
Figura 4.18 – Módulo de deformação estático e dinâmico.....	53
Figura 4.19 – Resistência à compressão ensaiada e estimada.	54
Figura 4.20 – Curva de conversão entre índice esclerométrico e Resistência à compressão para agregado graúdo de seixo.....	55
Figura 4.21 – Curva de conversão entre índice esclerométrico e Resistência à compressão para agregado graúdo de calcário.....	56
Figura 4.22 – Curva de conversão entre índice esclerométrico e Resistência à compressão para agregado graúdo de basalto.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Corpos de prova disponíveis para ensaio	31
Tabela 3.2 – Caracterização do concreto no estado fresco.	32
Tabela 4.1 – Resultados médios de concretos no estado endurecido.	38
Tabela 4.2 – Resultados médios de módulo de deformação estático em GPa.	40

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
ACI	American Concrete Institute
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Européen de Normalisation
$D_{máx}$	Dimensão máxima característica
E_{ci}	Módulo de deformação estático tangente inicial do concreto
E_{cs}	Módulo de deformação estático secante do concreto
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico do concreto
f_c	Tensão de ruptura à compressão do concreto
FHIP	Fundación Iberoamericana de Hormigón Premesclado
FIB	Fédération Internationale du Béton
NBR	Norma Brasileira Registrada
α	Coeficiente de significância
α_E	Coeficiente de correção do módulo em função da natureza do agregado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS GERAIS.....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO	16
2.1	MÓDULO TANGENTE INICIAL	16
2.2	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE	17
2.3	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO	17
2.4	FATORES QUE INFLUENCIAM NO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO.....	19
2.4.1	Agregado Graúdo	20
2.4.2	Pasta de cimento	21
2.4.3	Zona de Transição.....	21
2.4.4	Parâmetros de ensaio.....	21
2.4.5	Idade do concreto	22
2.5	PREVISÃO DO MÓDULO A PARTIR DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	22
2.5.1	Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).....	23
2.5.2	Fédération Internationale du Béton (FIB).....	26
2.5.3	European Committee of Standardization (CEN)	26
2.5.4	American Concrete Institute (ACI)	27
3	PARTE EXPERIMENTAL	28
3.1	VARIÁVEIS ESTUDADAS	28
3.2	MATERIAIS.....	29
3.3	CORPOS DE PROVA	30
3.4	ENSAIOS	33
3.4.1	Esclerômetro de Reflexão	34
4	RESULTADOS E ANÁLISES	38

4.1	ANÁLISE DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO.....	41
4.1.1	Tipo de Agregado	41
4.1.2	Relação água/cimento	43
4.1.3	Idade.....	46
4.1.4	Abatimento	48
4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM AS EQUAÇÕES PROPOSTAS PELAS NORMAS	49
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO.....	52
4.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA PELO ESCLERÔMETRO DE REFLEXÃO.....	54
5	CONCLUSÕES.....	57
6	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – Resultados individuais	63

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado do mundo. Em 2009 a Fundación Iberoamericana de Hormigón premesclado (FHIP) estimou um consumo de 11 bilhões de toneladas por ano, quase 2 toneladas por habitante do planeta (PEDROSO, 2009). Todo esse consumo justifica um grande interesse no estudo das propriedades e metodologias de produção e ensaio, em busca de economia e melhorias das características do material.

Este leque de possibilidades pode ser explicado por sua versatilidade, adaptando-se a quase qualquer forma no estado fresco e fabricação simples, por seu custo relativamente baixo, a possibilidade de combinação com outros materiais, sua resistência à compressão e boa durabilidade, principalmente em contato com a água.

Mesmo com o desempenho satisfatório do concreto, o desenvolvimento de métodos, componentes e materiais a serem associados com ele para o melhoramento de suas propriedades é uma área que desperta grande interesse. Concretos com capacidades especiais em diversas propriedades já foram, e continuam sendo desenvolvidos e estudados, buscando resultados superiores em resistência à tração, flexão, módulo de deformação, permeabilidade, redução do peso, resistência a ataques químicos e retração.

O módulo de deformação do concreto já foi uma propriedade negligenciada por engenheiros e centrais de dosagem, mas “o aumento das resistências dos concretos, somado à evolução dos métodos de cálculo com o uso do computador, gerou mudanças nos padrões construtivos e arquitetônicos” (MARTINS, 2008, p.19) com a construção de edifícios mais altos e elementos estruturais mais esbeltos (com menor inércia), além de grandes deformações em construções antigas que atingiram noticiários, colocaram esta propriedade em foco.

Nas últimas revisões da NBR 6118 (ABNT, 2014), em 2003 e 2014 respectivamente, houve mudanças nas considerações de valores de módulo de deformação do concreto. Em 2003, a alteração da fórmula para determinação teórica a partir da resistência à compressão para o módulo de deformação levou a uma redução em seus valores de até 25% (SILVA, R., 2008). Já na última revisão de 2014 a fórmula foi alterada para considerar o tipo de agregado como fator modificador do módulo de deformação, trazendo mais segurança para os dimensionamentos dos Estados Limites de Serviço em estruturas de concreto armado.

A deformação de estruturas de concreto está relacionada a fatores estéticos, econômicos, estruturais e de durabilidade. A ocorrência de fissuras em revestimentos e pisos devido a movimentação excessiva da estrutura são consequências comuns e que afetam diretamente o usuário, além da sensação de insegurança causada por peças com deflexão excessiva como o recorte de jornal da Figura 1.1 ilustra.

Figura 1.1 – Notícia sobre problemas causados por deformações lentas



Fonte: Gomide, Liporoni e Ferrari Neto (2003).

A necessidade de retirada rápida de formas e escoramentos pode gerar problemas devido à solicitação precoce do concreto. A deformação excessiva gera fissuras que podem permitir a entrada de agentes agressivos e a correção de deflexões no acabamento podem gerar carregamentos não previstos sobre a estrutura.

O estudo das propriedades do concreto é de extrema importância para a segurança das edificações, devendo ser observado atentamente tanto por projetistas quanto executores.

Os métodos trazidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) são utilizados para estimativa do módulo a partir da resistência do concreto para verificação da flecha no Estado Limite de Serviço, mas a concepção do projeto pode levar a exigência de valores de módulo maiores para cumprimento do desempenho ótimo da estrutura. Ainda assim, esta propriedade dificilmente é medida no concreto executado, e as estimativas da norma não levam em conta as diferentes idades em que o concreto é solicitado.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os concretos que serão analisados neste trabalho foram moldados enquanto a NBR 6118 (ABNT, 1978) estava em processo de revisão, e os dados obtidos foram comparados com os valores estabelecidos pela norma vigente e com os propostos para a atualização, além de outras normas internacionais e propostas de pesquisadores. Como já abordado anteriormente esta norma foi revisada novamente e outra vez foram alterados os valores estimados, portanto, uma nova base de comparação pode ser apresentada, acompanhando a evolução não só dos corpos de prova estudados, como também do entendimento geral da engenharia acerca desta propriedade.

As análises anteriores geraram trabalhos de conclusão de curso por Costa e Prado (2001) para titulação de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Goiás (UEG), e Silva, K. (2003) para Tecnólogo em Construção de Edifícios pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás (CEFET-GO), com artigo publicado no 47º Congresso Brasileiro de Concreto (PRADO et al, 2005).

Nos trabalhos anteriores foi possível concluir que os agregados formam três grupos distintos nos resultados de módulo de deformação, com o basalto apresentando os melhores resultados, e o seixo os piores, como era esperado baseando-se na literatura disponível.

Além do tipo litológico do agregado estes trabalhos também analisaram a relevância do fator água/cimento, da consistência do concreto no estado fresco, e a

idade do corpo de prova. Todas estas variáveis se mostraram significativas numa análise de variância até os 413 dias de idade.

Foi realizado um mapeamento literário, que pode ser encontrado no Anexo 4, e poucos trabalhos foram encontrados avaliando módulo de elasticidade do concreto em idades avançadas em condições controladas. No mapeamento realizado foram encontrados apenas quatro trabalhos com acompanhamento por mais de 1 ano.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho busca trazer um maior esclarecimento acerca da evolução do módulo de deformação de concretos confeccionados com diferentes agregados, por meio da realização de ensaios em corpos de prova com idade aproximada de 18 anos. Os resultados obtidos serão comparados com as análises feitas aos 7, 28, 91 e 413 dias de idade e a diversos métodos de estimativa do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Por meio de ensaio com esclerômetro de reflexão, segundo NBR 7584 (ABNT, 2012), estimar a resistência à compressão dos corpos de prova disponíveis em número insuficiente para realização de ensaios destrutivos;
- Determinar o módulo de elasticidade estática dos diferentes traços disponíveis seguindo os ensaios da NBR 8522 (ABNT, 2017);
- Comparar os resultados encontrados com os dados anteriores obtidos por Costa e Prado (2001) e Silva, K. (2003), e com os métodos de previsão a partir da resistência à compressão das principais normas para dimensionamento estrutural.
- Realizar análise estatística para determinar relevância das variáveis selecionadas para o estudo: fator a/c, tipo de agregado graúdo e consistência no estado fresco.

2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

Segundo Martins (2008) a melhora na resistência dos concretos, na indústria do cimento Portland, o aumento no uso e desenvolvimento de aditivos, além de métodos de cálculo mais precisos, trouxe mudanças nas concepções arquitetônicas, permitindo prédios mais altos, vãos maiores e peças mais esbeltas que levam a maiores deformações.

Com estes novos fatores, para garantia da conformação das deformações aos limites estabelecidos pela ABNT NBR 6118 (2014), os projetistas passaram a definir, além da resistência à compressão, o módulo de deformação a ser atingido pelo concreto.

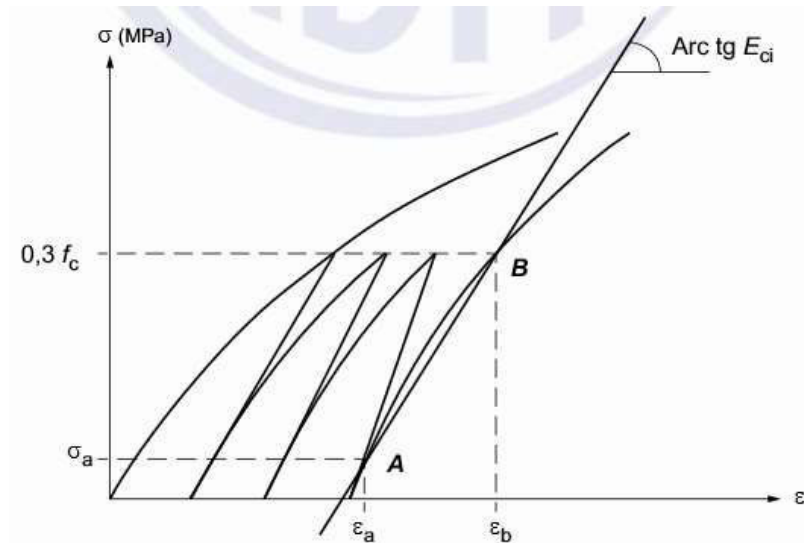
O conceito de módulo de elasticidade ou módulo de Young, definido como a relação entre a tensão aplicada sobre um corpo e a deformação por ele imediatamente sofrida, vem da lei de Hooke que no século XVII constatou a proporcionalidade entre estas grandezas (PACHECO *et al*, 2014).

O concreto não possui tal proporcionalidade, pois não é um material homogêneo, possuindo três fases principais que são internamente heterogêneas, pasta de cimento endurecida, agregado graúdo e zona de transição. Cada uma destas fases possui diferentes propriedades, que também não são homogêneas, o que aumenta a complexidade do comportamento do material (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Isto faz com que o comportamento do gráfico de tensão-deformação não seja linear, o que impossibilita a determinação de um real módulo de Young, por isso são definidos diferentes módulos de elasticidade ou deformação para o concreto (VASCONCELOS E GIAMMUSSO, 2009).

2.1 MÓDULO TANGENTE INICIAL

O módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}), é dado pela inclinação da reta tangente à origem do diagrama. A norma ABNT NBR 8522 (2017) no item 3.6, estabelece o E_{ci} como equivalente ao módulo estabelecido por uma reta traçada entre o ponto da curva tensão-deformação correspondente a 0,5 MPa ou à deformação de 50×10^{-6} e o ponto correspondente a 30% da tensão de ruptura (f_c) após carregamentos sucessivos do corpo de prova para simular a estrutura em trabalho, conforme Figura 2.1.

Figura 2.1 – Representação esquemática do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017).

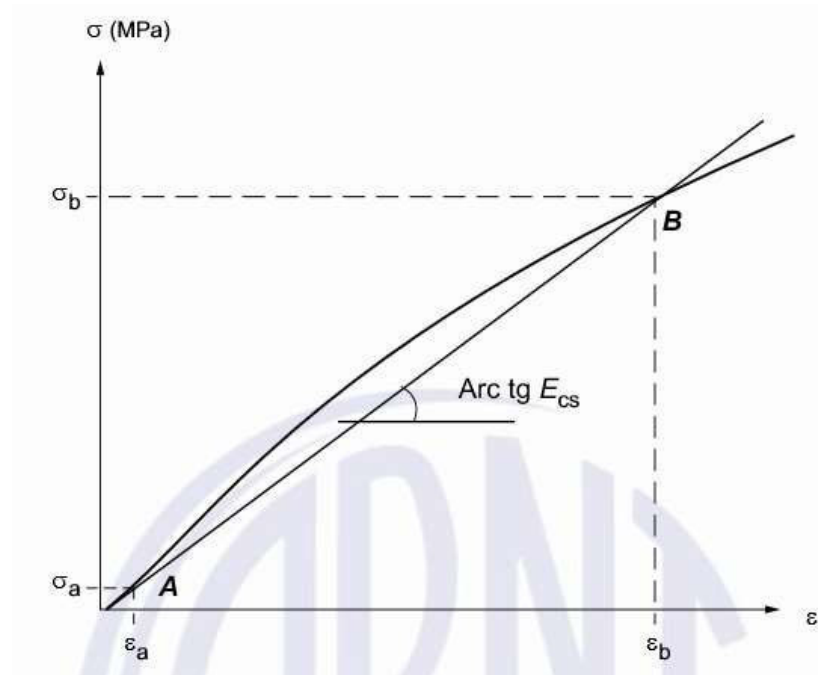
2.2 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE

O módulo de deformação secante (E_{cs}) é definido na NBR 8522 (ABNT, 2017) no item 3.5, como a declividade de uma reta traçada entre o ponto da curva correspondente à tensão de 0,5 MPa ou à deformação de 50×10^{-6} e um ponto correspondente à tensão determinada para o ensaio sem carregamentos prévios, conforme Figura 2.2. Este valor é utilizado para avaliação de deformações em estruturas no seu primeiro carregamento. Mehta e Monteiro (2008), também definem a origem da reta a ser avaliada na origem do diagrama, mas traz o conceito do módulo de deformação cordal, que possui a mesma consideração para a origem da reta trazida pela NBR 8522, para correção de uma pequena concavidade que tende a aparecer no diagrama.

2.3 MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DINÂMICO

Este módulo não é definido nas normas brasileiras ABNT NBR 6118 (2014) e NBR 8522 (2017). Mehta e Monteiro (2008, p.90) aproximam este do módulo de elasticidade tangente inicial, sugerem que “para análises de esforços em estruturas

Figura 2.2 – Representação esquemática do módulo de deformação secante (E_{cs}).



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017).

submetidas a terremotos ou cargas de impacto [seu uso] é mais apropriado [...], pode ser determinado mais precisamente por um teste sônico”. Os ensaios de propagação de onda ultrassônica, como definidos pela ABNT NBR 15630 (2016) para argamassas e pela ASTM C-597 (2016) para concretos, estabelecem relação entre a velocidade de propagação desta onda através do concreto com o módulo de deformação dinâmico por meio da relação:

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu}$$

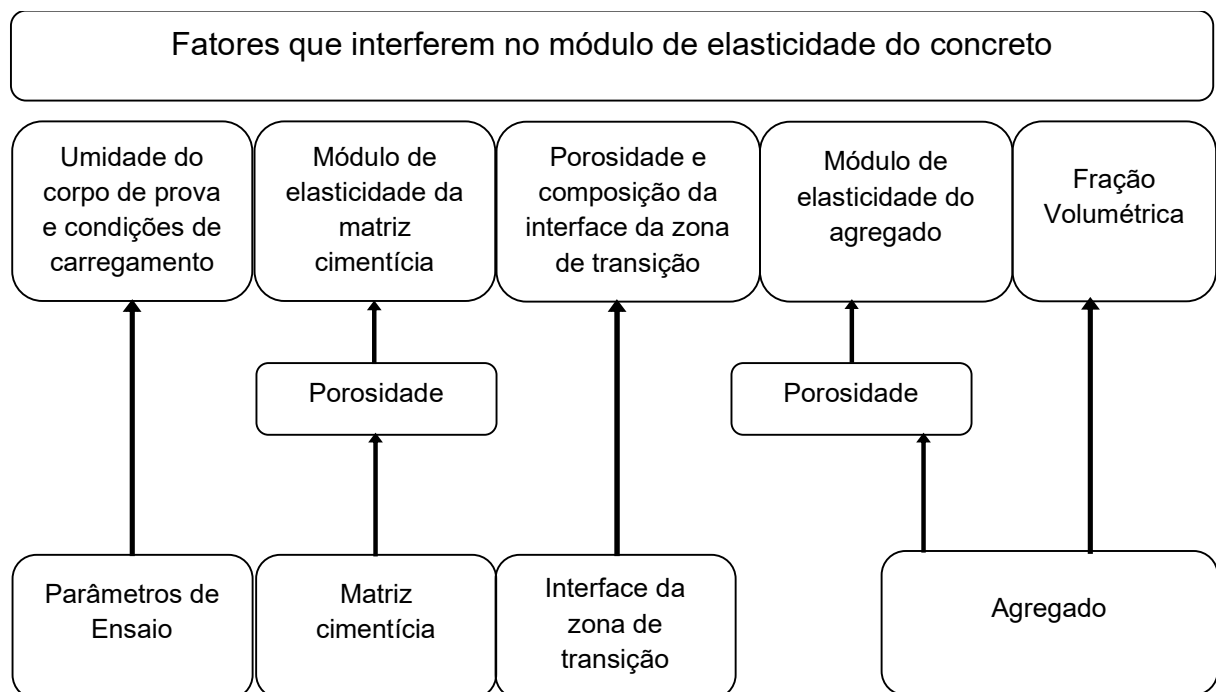
Onde:

- E_d é o módulo de deformação dinâmico em MPa;
- v é a velocidade de propagação da onda em mm/ μ s;
- ρ é a densidade aparente do corpo-de-prova em kg/m³;
- μ é o coeficiente de Poisson, adotado 0,2.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO

A maior parte dos fatores que afetam a resistência à compressão afetam também o módulo de deformação como relação água/cimento, tipo de cura e idade. Tal semelhança vem do fato de ambas estarem intimamente ligadas a porosidade do concreto como pode ser visto na Figura 2.3 (MEHTA E MONTEIRO, 2008). O tipo de agregado graúdo também é muito influente no módulo de deformação, assim como sua proporção na mistura, por ser a fase com maior estabilidade dimensional.

Figura 2.3 – Fatores que interferem no módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

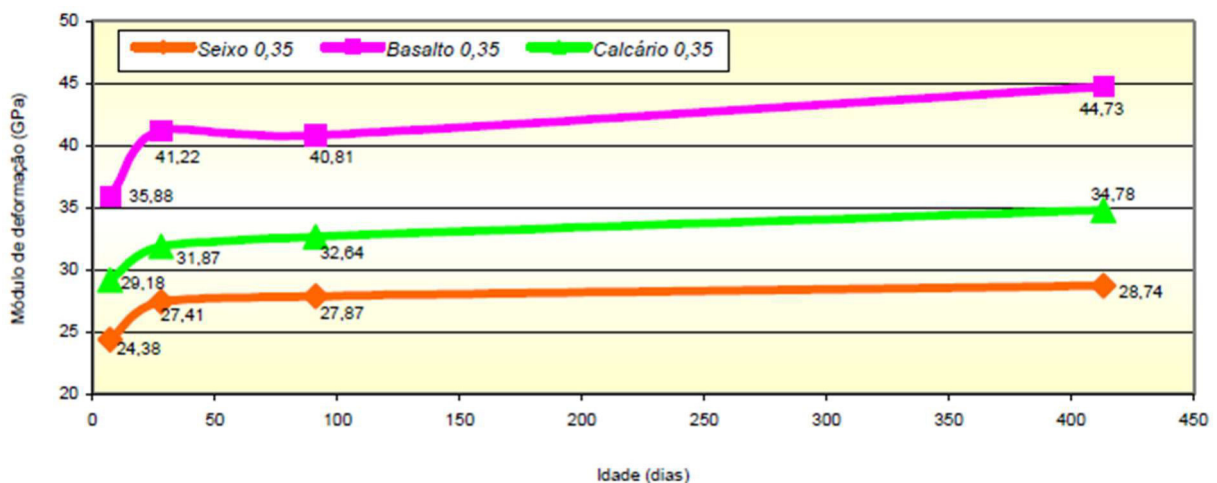
O método e as condições do ensaio apesar de não terem influência na propriedade intrínseca do material, trazem grande variação para o resultado que será atribuído a ela. Pesquisas demonstram a influência da forma (MARTINS, 2008), umidade (BROOKS, 2005; MEHTA E MONTEIRO, 2008; MONTIJA, 2007) e condição de armazenamento dos corpos de prova (MONTIJA, 2007).

2.4.1 Agregado Graúdo

A principal característica do agregado para o módulo de deformação é sua porosidade, sendo determinante para a rigidez do material. Agregados mais densos com alto módulo de deformação produzem concretos com maior módulo (MARTINS, 2008). Essa influência é evidenciada em idades mais avançadas já que a pasta de cimento pouco hidratada tem baixa resistência e módulo, baixando muito o desempenho da mistura (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Costa e Prado (2001) e Silva, K. (2003) evidenciaram a influência dos agregados no módulo de deformação como pode ser observado na Figura 2.4. Os ensaios realizados com 7, 28, 91 e 413 dias, mostram a diferença no módulo entre os diferentes tipos de agregados.

Figura 2.4 – Relação entre módulo de elasticidade e idade para diferentes tipos de agregado.



Fonte: Silva, K. (2003).

Também relevante para o módulo são o diâmetro, formato e a fração volumétrica que este representa no concreto. O diâmetro e formato podem influenciar no volume e composição da zona de transição, fase mais frágil do material, segundo Mehta e Monteiro (2008, p.26):

[...]quanto maior o tamanho do agregado no concreto e quanto maior a proporção de partículas alongadas e achatadas, maior será a

tendência de acúmulo de filme de água junto a superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado.

2.4.2 Pasta de cimento

Assim como no agregado gráudo a porosidade é determinante. A porosidade da pasta pode ser afetada por diversos fatores como relação água/cimento, teor de ar aprisionado, aditivos e grau de hidratação do cimento. Melo Neto e Helene (2002) demonstram que com o aumento do consumo de cimento, a pasta se torna mais importante para o módulo de elasticidade. Se for mantido constante o abatimento, o maior consumo indicará menor relação a/c, aumentando o módulo de elasticidade da pasta e melhorando o desempenho. Se for mantido constante a relação água/cimento, a redução do volume de agregado causará redução do módulo.

2.4.3 Zona de Transição

O principal responsável pela não-linearidade do diagrama tensão-deformação do concreto é a microfissuração da zona de transição (MEHTA E MONTEIRO, 2008). A interface pasta-agregado possui propriedades diferentes do restante da mistura cimentícia, com maior volume de vazios e proporção diferente dos elementos componentes, apresentando maior presença de cristais de hidróxido de cálcio e etringita. O volume de vazios da zona de transição é controlado pelos mesmos fatores que determinam a porosidade com a pasta e ainda com a interação química entre cimento e agregado e a distribuição granulométrica deste (MARTINS, 2008).

A diminuição da zona de transição pode ser conseguida com a utilização de agregados gráudos menores ou mais graduados (MARTINS, 2008), como visto anteriormente quanto maior o agregado, maior o volume da zona de transição (MEHTA E MONTEIRO, 2008), e a melhor graduação de tal agregado ajuda a distribuir melhor a pasta. Também pode-se conseguir a diminuição dos vazios na zona de transição com a utilização de adições minerais.

2.4.4 Parâmetros de ensaio

Os parâmetros de ensaio podem exercer influência sobre os resultados obtidos. Variações de Umidade na amostra, chegam a representar um aumento de 15% no valor de módulo de deformação em medidas realizadas em amostras úmidas contra

as secas, mesmo com os resultados de resistência à compressão apresentando resultados opostos. Brooks (2005) sugere que a água dos vazios por ser virtualmente incompressível ajuda o concreto a resistir as deformações.

A taxa de aplicação do carregamento deve ser constante e em velocidade baixa. Quando o carregamento é aplicado rapidamente há menos tempo de serem geradas microfissuras, levando a maiores valores de módulo de deformação, porém acima de 2 min, tais variações são muito baixas (MARTINS,2008).

O preparo do corpo de prova e dos pratos da prensa também podem levar a diferenças no valor de módulo de deformação. Podem surgir tensões na superfície do corpo de prova devido ao atrito com o prato devido a deformação transversal, além de concentrações de tensões devido a superfícies irregulares.

2.4.5 Idade do concreto

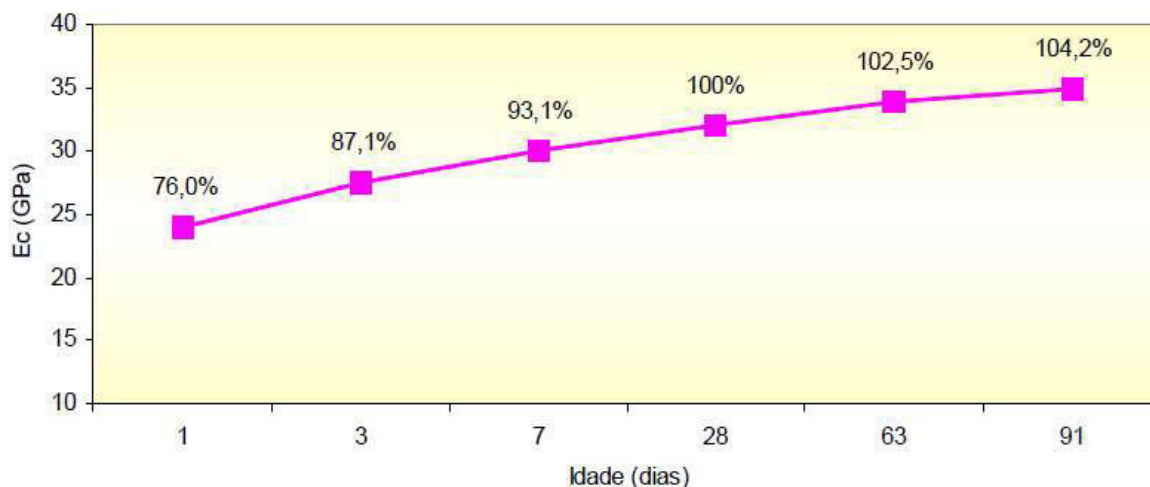
A relação entre o grau de hidratação do cimento e as propriedades do concreto é bem conhecida. Assim como a resistência à compressão, a hidratação também acarreta o aumento da rigidez da pasta e a formação de mais cristais na zona de transição levando ao aumento do módulo de elasticidade.

A idade de 28 dias é utilizada como base para determinação das propriedades características do concreto, e normalmente é o tempo recomendado para que possa haver solicitação da estrutura. Existem alguns parâmetros para cálculos de propriedades do concreto em idades inferiores para o caso de estruturas que precisem ser solicitadas precocemente. Dal Molin (1995) observou em seus estudos que em média 76% do módulo de deformação aos 28 dias é obtido no primeiro dia de cura do concreto como mostra a Figura 2.5.

2.5 PREVISÃO DO MÓDULO A PARTIR DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Mesmo com maior conscientização sobre a importância do módulo de deformação, nem sempre esta propriedade é medida no concreto lançado. Engenheiros calculistas se respaldam pelos métodos de estimativa do módulo a partir da resistência à compressão para o dimensionamento das estruturas sem que seja especificado um módulo a ser atingido.

Figura 2.5 – Efeito isolado da idade sobre o módulo de deformação do concreto



Fonte: Dal Molin (1995).

Tais métodos geralmente utilizam o valor da resistência do concreto aos 28 dias como o encontrado na NBR 6118 (ABNT, 2014), mas também existem em normas e literatura equações para estimar o módulo em idades menores de 28 dias. Por serem normalmente estabelecidas pelo ensaio de concretos de várias resistências, confeccionados com determinados materiais, a precisão está ligada à semelhança entre os materiais utilizados e os que levaram à expressão.

2.5.1 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

A Norma Brasileira 6118:1978 – Projeto e dimensionamento de estruturas de concreto – Procedimento estava em processo de revisão quando foram moldados os corpos de prova aqui analisados. A versão da norma em vigência trazia a seguinte expressão para previsão do módulo de deformação tangente inicial:

$$E_{ci} = 6600 \cdot \sqrt{f_{ck} + 3,5}$$

onde:

E_{ci} é o módulo de deformação tangente inicial em MPa;

f_{ck} é a resistência à compressão aos 28 dias, medido em corpos de prova cilíndricos em MPa.

Para o módulo de elasticidade secante, a ser utilizado para avaliação de comportamento da estrutura, a norma trazia a seguinte equação:

$$E_{cs}=0,9 \cdot E_{ci}$$

onde:

E_{cs} é o módulo de deformação secante em MPa;

O texto final de atualização da norma, publicado em 2003 e vigente a partir de 2004, trouxe alterações nos fatores da expressão para o E_{ci} , que levaram a reduções nos valores estimados de cerca de 25%. Estes fatores foram alterados devido a constatações de que os concretos confeccionados no Brasil não chegavam aos valores de módulo estimados pela NBR 6118:1978 (ABNT, 1978). As expressões apresentadas pela ABNT NBR 6118:2003 (ABNT, 2003) eram:

$$E_{ci}=5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

e,

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

Durante o processo de atualização que levou a publicação desta versão, foram estudados a adoção de índices relativos ao tipo litológico do agregado graúdo e à consistência do concreto no estado fresco para melhor corresponder aos valores de módulo de deformação encontrados nos concretos, contudo estes não chegaram ao texto final.

Na atualização mais recente, o tipo de agregado graúdo foi considerado para o cálculo do módulo de elasticidade estimado. Também foi alterada a fórmula para contemplar concretos de alta resistência que se tornaram mais comuns nos últimos anos. As atuais expressões utilizadas no dimensionamento de estruturas, trazidas pela NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) são:

$$E_{ci}=\alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

para f_{ck} de 20 MPa a 50 MPa;

$$E_{ci}=21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$$

para f_{ck} de 55 MPa a 90 MPa.

onde:

$\alpha_E =$ 1,2 para basalto e diabásio;
 1,0 para granito e gnaiss;
 0,9 para calcário;
 0,7 para arenito.

Para o módulo de elasticidade secante:

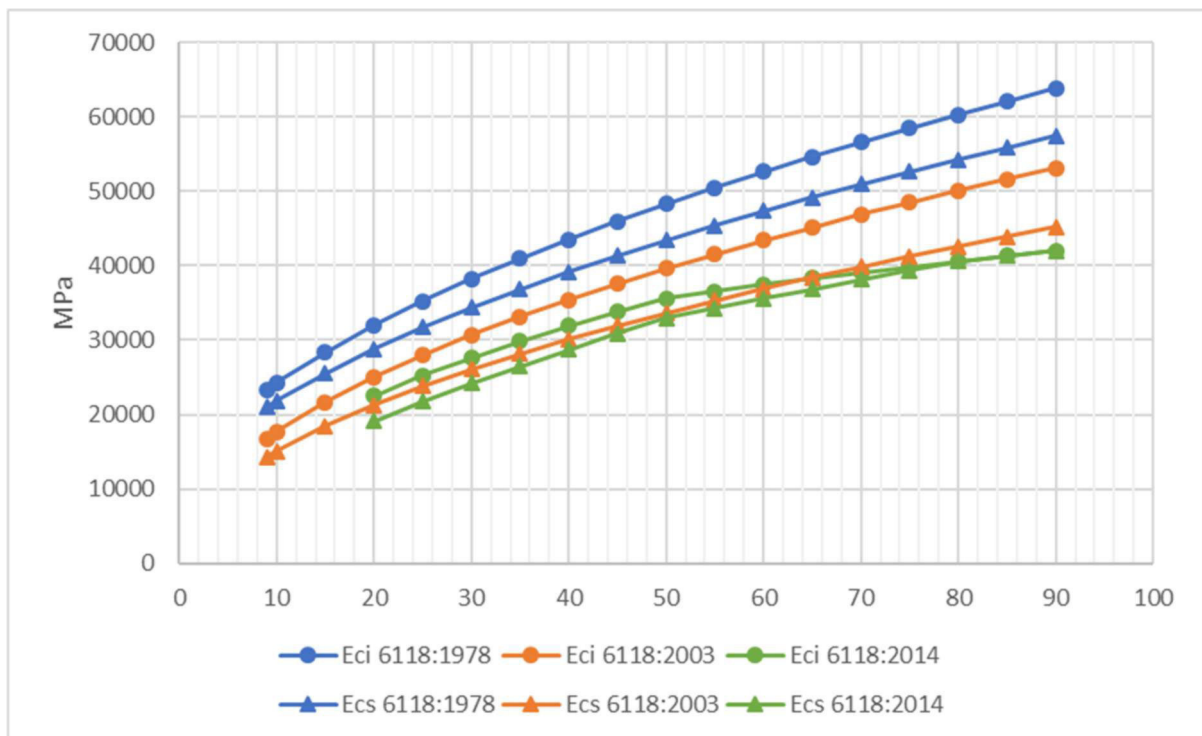
$$E_{cs} = \alpha_i \cdot E_{ci}$$

onde:

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \leq 1,0$$

Uma visão geral de como as mudanças afetaram os valores de módulo de deformação estimados pela norma pode ser observada na Figura 2.6, considerando concreto confeccionado com calcário.

Figura 2.6 – Valores de módulo de deformação estimados pela NBR 6118 para diferentes resistências à compressão.



Fonte: Próprio autor.

2.5.2 Fédération Internationale du Béton (FIB)

A FIB é a antiga CEB/FIP responsável pelo *Model Code 2010* (FIB, 2010). As expressões utilizadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para estimativa do E_{ci} em concretos de alta resistência (Acima de 50 MPa) foram baseadas nas do Model Code 2010, incluindo os coeficientes adotados para os diferentes tipos de agregados graúdos. Uma variação da expressão é admitida quando o valor da resistência à compressão foi obtido de ensaios em corpos de prova de concreto ficando como segue:

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$$

Onde:

f_{cm} é o valor ensaiado de resistência à compressão do concreto com 28 dias de idade em MPa.

O valor para o módulo reduzido, equivalente ao módulo de deformação secante, também tem uma leve alteração no coeficiente α_i :

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{88} \right) \leq 1,0$$

2.5.3 European Committee of Standardization (CEN)

O *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings* (CEN, 2004) traz valores tabelados de módulo de elasticidade secante para diferentes classes de resistência, considerando agregado quartzítico. A tabela também acompanha a seguinte expressão para cálculo da propriedade:

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3}$$

Onde:

E_{cm} é o módulo de elasticidade secante em GPa.

O Eurocode 2 traz também a orientação que os valores devem ser alterados de acordo com o tipo de agregado utilizado no concreto. Em caso de utilização de

agregado calcário deve ser reduzido em 10 %, 30% para arenitos, e deve ser aumentado em 20% para o caso de agregado basáltico.

2.5.4 American Concrete Institute (ACI)

A norma ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI, 2019) permite o cálculo do módulo de deformação para concretos leves, com massa específica entre 1440 e 2560 kg/m³ a partir da expressão:

$$E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c}$$

Onde:

E_c é o módulo de elasticidade em MPa;

w_c é a massa específica do concreto em kg/m³;

f'_c é a resistência à compressão do concreto em MPa.

Para concretos convencionais pode ser determinado pela expressão:

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$$

3 PARTE EXPERIMENTAL

Apresenta-se adiante os materiais utilizados, as variáveis analisadas, e a metodologia empregada neste trabalho.

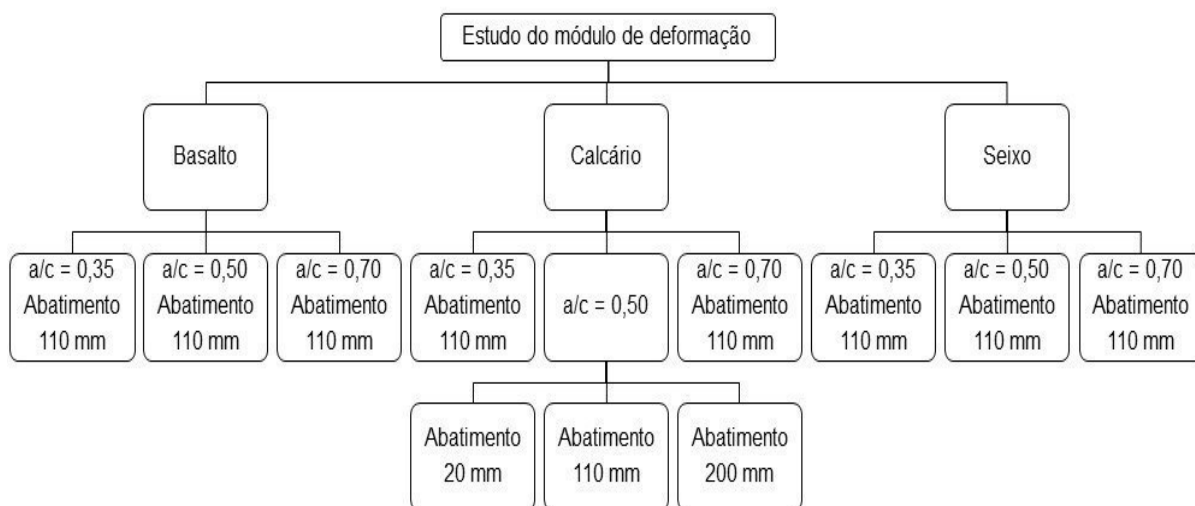
3.1 VARIÁVEIS ESTUDADAS

As variáveis selecionadas para estudo por Costa e Prado (2001) foram:

- Relação água/cimento (a/c): 0,35, 0,50 e 0,70;
- Abatimento do concreto: 20 mm, 110 mm e 200 mm;
- Tipo do agregado: calcário, basalto e seixo de leito de rio;
- Idade do concreto: 7, 28 e 91 dias;

O trabalho posterior de Silva, K. em 2003, analisou estas mesmas variáveis em idade de 413 dias, e neste aos 18 anos de idade. Pela combinação destas se definiu 11 famílias de concreto conforme Figura 3.1.

Figura 3.1 – Famílias de concreto obtidas pela combinação das variáveis



Fonte: adaptado de Silva, K. (2003).

A relação a/c está diretamente ligada a resistência do concreto, seu aumento causa o aumento da porosidade, devido ao espaço ocupado pela água na mistura ficar vazio após a hidratação e secagem do concreto. Com a variação de 0,35 a 0,70

neste fator, obteve-se concretos de pouco a muito porosos para avaliar a interferência desta propriedade no módulo de deformação.

Os concretos confeccionados para se analisar a influência do abatimento possuem a mesma relação a/c, com este mantido constante “[...]uma variação do abatimento provocará uma conseqüente variação do teor de agregados” (MELO NETO E HELENE, 2002, p.10). Para que seja atingida menor fluidez sem aditivos e com o mesmo relação a/c é necessário um aumento no volume de agregado graúdo o que pode gerar aumento no módulo de deformação.

Como já discutido antes, Mehta e Monteiro (2008) chama atenção para a importância do agregado graúdo para a estabilidade dimensional e módulo de elasticidade do concreto. Bilesky *et al* (2018) também constataram a interferência do tipo mineralógico do agregado, mas ressaltaram que nem sempre o agregado é identificado corretamente pelo fornecedor. O módulo de deformação de cada agregado, assim como sua porosidade e existência de microfissuras são fatores a serem considerados e avaliados antes da confecção do concreto.

A evolução das propriedades do concreto ao longo do tempo é uma característica bem conhecida. Isso ocorre devido a hidratação continuada do cimento durante o uso da estrutura, aumentando a densidade de produtos de hidratação consequentemente gerando maior interação entre as moléculas. Este trabalho procura evidenciar esta evolução ao avaliar corpos de prova em idade avançada.

3.2 MATERIAIS

Foram utilizados os corpos de prova restantes dos trabalhos realizados por Costa e Prado (2001) e por Silva, K. (2003), onde foi estudada a influência do tipo de agregado graúdo, fator água/cimento e consistência do concreto fresco para o módulo de deformação nas idades de 7, 28, 91 e 413 dias.

Os concretos foram confeccionados com os seguintes materiais:

- a) Aglomerante hidráulico: Cimento Portland composto CP II F 32;
- b) Agregado miúdo: areia média natural procedente da jazida do Rio do Peixe, município de Faina – GO;
- c) Agregados graúdos (Figura 3.2):
 - Brita 1 D_{máx.} = 19 mm (calcário proveniente do município de Cesarina - GO);

- Brita 1 D_{máx.} = 19 mm (basalto proveniente do município de Cachoeira Dourada – GO);
- Seixo de leito de rio D_{máx.} = 19 mm (proveniente do município de Goianésia – GO);

A caracterização física e química dos materiais pode ser observada no trabalho de Costa e Prado (2001).

Figura 3.2 – Agregados graúdos utilizados na confecção dos concretos.



Fonte: Costa e Prado (2001).

3.3 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram moldados segundo a NBR 5738 (ABNT, 1984). Neste trabalho foram utilizados os corpos de prova não rompidos nos trabalhos anteriores de Costa e Prado (2001) e Silva, K. (2003), que ficaram armazenados no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Campus Goiânia (Figura 3.3). Na Tabela 3.2 pode-se conferir as características no estado fresco dos 11 concretos moldados para os experimentos e

na Tabela 3.1 estão discriminadas a quantidade de corpos de prova disponíveis de cada traço.

Figura 3.3 – Corpos de prova utilizados nos ensaios.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3.1 – Corpos de prova disponíveis para ensaio

Traço	Seixo 0,35 110 mm	Seixo 0,50 110 mm	Seixo 0,70 110 mm	Calcário 0,35 110 mm	Calcário 0,50 20 mm	Calcário 0,50 110 mm	Calcário 0,50 200 mm	Calcário 0,70 110 mm	Basalto 0,35 110 mm	Basalto 0,50 110 mm	Basalto 0,70 110 mm
Qtde.	1	2	1	5	5	5	6	5	4	7	5
Total	46										

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 3.2 – Caracterização do concreto no estado fresco.

Concreto	Traço Unitário				Massa específica NBR-9833	Teor de ar medido	Teor de Argamassa seca	Teor de argamassa úmida ¹	Relação água/material seco A%	Consumo de cimento/ m³ de concreto	Consumo de Água/ m³ de concreto	Abatimento
	(c:a:b) ²		a/c		(kg/dm³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kg/m³)	(kg/m³)	(mm)
Seixo 0,70	1	2,69	4,17	0,70	2,351	-	46,9	56,28	8,90	274,65	192,26	90
Seixo 0,50	1	1,68	3	0,50	2,357	-	47,2	56,10	8,80	383,31	191,65	120
Seixo 0,35	1	0,84	1,81	0,35	2,362	-	50,4	58,97	9,58	593,81	207,83	100
Calcário 0,70	1	2,71	3,22	0,70	2,361	0,700	53,5	63,29	10,10	307,73	215,41	95
Calcário 0,50-20mm	1	2,25	2,64	0,50	2,393	1,600	55,2	63,23	8,48	376,06	188,03	20
Calcário 0,50-110mm	1	1,81	2,39	0,50	2,382	0,800	54,0	63,09	9,61	416,09	208,45	110
Calcário 0,50-200mm	1	1,43	2,07	0,50	2,342	0,900	54,0	64,09	11,11	468,37	234,18	200
Calcário 0,35	1	0,9	1,6	0,35	2,393	1,000	54,3	63,16	10,00	614,71	215,14	80
Basalto 0,70	1	2,76	3,28	0,70	2,431	0,800	53,4	64,41	9,94	310,28	217,19	120
Basalto 0,50	1	1,86	2,46	0,50	2,439	0,550	53,8	64,05	9,39	417,94	208,97	90
Basalto 0,35	1	0,9	1,6	0,35	2,443	0,600	54,3	64,49	10,00	634,70	222,14	80

Fonte: Costa e Prado (2001).

¹ Teor de argamassa úmida = $\frac{1+a+a/c}{1+m+a/c} * 100$
² Traço (cimento:areia:brita) em massa

3.4 ENSAIOS

No estado endurecido o concreto foi caracterizado pelos ensaios determinados pelas normas citadas a seguir com algumas adaptações devido a limitações operacionais e disponibilidade de amostras:

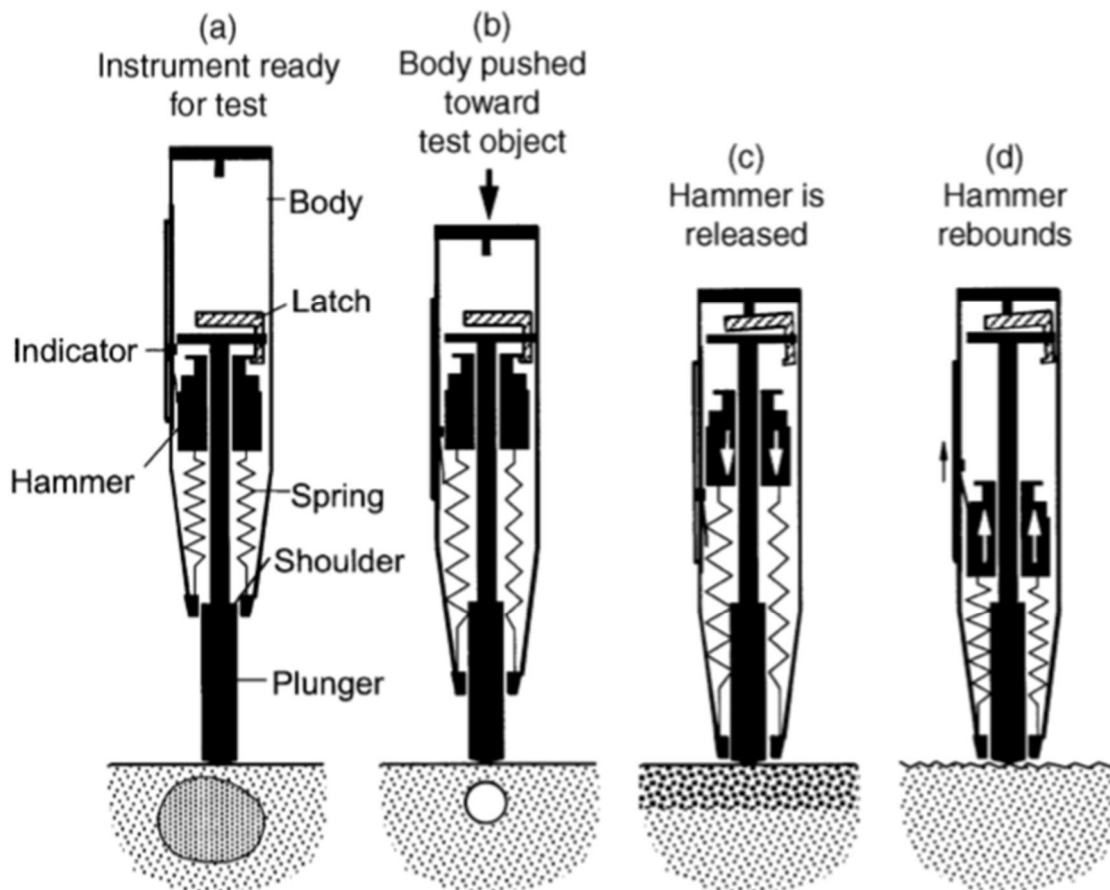
- Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto – NBR 5739 (ABNT, 2018);
- Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – NBR 7222 (ABNT, 2010);
- Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão – NBR 8522 (ABNT, 2017);
- Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio – NBR 7584 (ABNT, 2012);
- Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica – NBR 8802 (ABNT, 2019);
- Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica – NBR 15630 (ABNT, 2008) adaptada para concreto com validação da *Standard test method for pulse velocity through concrete* – C-597 (ASTM, 2016)

Como pode ser observado na Tabela 4.2, para alguns traços não existiam amostras suficientes para determinação da resistência à compressão pelo método descrito na NBR 5739 (ABNT, 2018) e posterior determinação do módulo de elasticidade tangente inicial. Por isso foi utilizado o método descrito pela NBR 7584 (ABNT, 2012) com algumas adaptações, para determinação da dureza superficial através do esclerômetro de reflexão. Pode ser traçada uma relação entre esta propriedade e a resistência à compressão do corpo de prova.

3.4.1 Esclerômetro de Reflexão

O primeiro Esclerômetro de Reflexão funcional foi desenvolvido por Ernst Schmidt no fim dos anos 40 e os modelos modernos se baseiam neste (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 2006). O operador comprime o êmbolo contra a superfície de concreto, o que afasta o martelo estendendo a mola interna. Quando é atingida a tensão máxima na mola, o martelo é liberado automaticamente. O Martelo se choca contra o topo do êmbolo e o ricochete causa nova tensão na mola, que é registrada no esclerômetro conforme Figura 4.4. A relação entre a tensão máxima da mola e a registrada é o índice esclerométrico.

Figura 3.4 – Esquema de operação do Esclerômetro de Reflexão Schmidt.



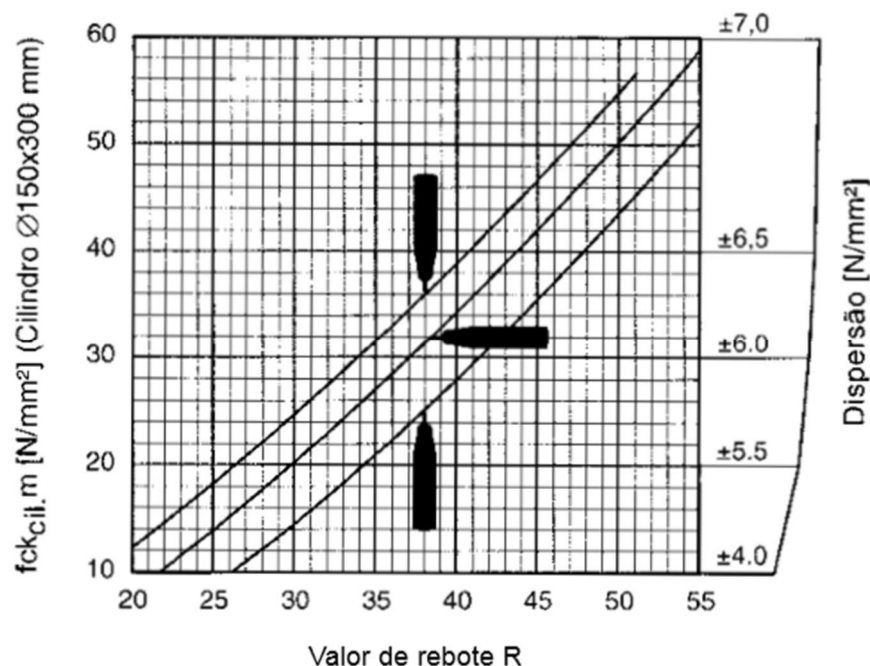
(a) Instrumento pronto para teste; (b) Corpo empurrado contra corpo de prova; (c) Martelo é liberado; (d) Martelo ricocheteia.

Fonte: ACI 228.1R-03 (ACI, 2003).

A distância do ricochete depende da energia cinética do martelo no momento do impacto e da quantidade de energia absorvida pelo sistema. Parte dela é absorvida pelo equipamento e outra parte pelo concreto. Quanto mais rígido e resistente o concreto, menos energia é absorvida (ACI, 2003). Este índice está ligado a dureza superficial do concreto, sendo relevante para camadas de até 30 mm de profundidade, a relação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão é estabelecida por métodos empíricos (BUNGEY, MILLARD E GRANTHAM, 2006).

A fabricante do equipamento utilizado, Proceq, traz no manual de utilização, quadros para relacionar o índice esclerométrico com a resistência à compressão para concretos confeccionados com Cimento Portland e agregado quartzítico com diâmetro máximo de 32mm, com idade entre 14 e 56 dias, ensaiados em corpos de prova cúbicos e cilíndricos, como a da Figura 4.5. Para utilização na avaliação de concretos com outras características existem alguns valores de correção, mas para uma relação mais confiável seria necessária a confecção de curvas próprias para o concreto estudado.

Figura 3.5 – Curva de equivalência entre índice esclerométrico e resistência à compressão.

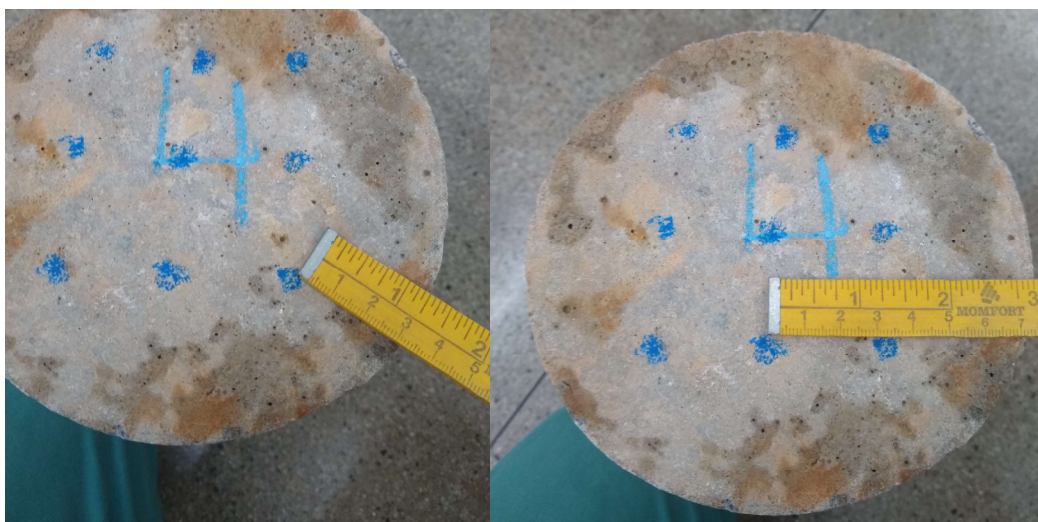


Fonte: Manual Martelo de teste de concreto Original Schmidt N (Proceq S.A., 2017).

Como o objetivo neste trabalho é apenas uma previsão da resistência à compressão para realização do ensaio de módulo de deformação, tais particularidades não serão consideradas, assim como, para facilitar a realização dos ensaios, algumas considerações tiveram que ser feitas em relação à NBR 7584 (ABNT, 2012).

Foram realizados apenas nove impactos na face mais regular de cada corpo de prova (a norma pede 16), com espaçamento entre centros de impacto de 30 mm, e a 30 mm da borda do corpo de prova nos pontos mais externos (a norma exige 50 mm), conforme Figura 4.6 , para estimar a resistência média de cada traço.

Figura 3.6 – Corpo de prova preparado para ensaio de dureza superficial por esclerometria.



Fonte: Próprio Autor.

A resistência dos corpos de prova é determinada através da fórmula:

$$I_{Ea} = k \cdot I_E$$

Onde I_{Ea} é o Índice esclerométrico efetivo a ser comparado com a curva de resistência fornecida pelo fabricante do esclerômetro; k é o fator de correção calculado a partir da divisão do Índice esclerométrico nominal pela média de pelo menos 10 impactos do esclerômetro na bigorna de aço normatizada; e I_E é a média dos valores de índice esclerométrico dos impactos em cada corpo de prova.

Os corpos de prova também foram caracterizados pela velocidade de propagação do pulso de ultrassom. A NBR 8802 (ABNT, 2019) estabelece o método de ensaio para aferição da velocidade de propagação em concreto endurecido, mas não estabelece relação com o módulo de deformação, citando apenas a determinação da homogeneidade do material. Na ABNT NBR 15630 (2008) é estabelecida a relação entre a velocidade de propagação da onda em argamassa com seu módulo de deformação, e a ASTM C-597 (2016) utiliza a mesma equação para o concreto endurecido, portanto há validação para avaliação em corpos de prova de concreto.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de resistência à compressão, módulo de deformação estático tangente inicial, resistência à tração por compressão diametral, resistência estimada por esclerometria e módulo de deformação dinâmico determinado através da propagação de onda ultrassônica. Os resultados para 7, 28 e 91 dias foram obtidos de Costa e Prado (2001), e os resultados para 413 dias foram retirados do trabalho de Silva, K. (2003).

A Tabela 4.2 estão os resultados para módulo de deformação estático de cada traço em todas as idades estudadas. Os resultados retirados dos trabalhos anteriores são médias de 3 amostras analisadas em cada situação, já o atual estudo possuía poucas amostras e portanto existem resultados que são médias de 3 ou 2 amostras e outras que são resultados individuais do único corpo de prova disponível para ensaio. No Anexo A podem ser encontrados os resultados individuais de cada ensaio, acompanhados de desvio padrão e coeficiente de variação onde se aplica.

Tabela 4.1 – Resultados médios de concretos no estado endurecido.

(continua)

CONCRETOS	Idade	Resistência a Compressão (MPa)	Módulo de deformação (GPa)	Resistência a Tração (MPa)	Resistência Estimada por Esclerometria (MPa)	Módulo de deformação dinâmico (GPa)
Seixo 0,35	7 dias	38,06	24,38	3,07	-	-
	28 dias	39,88	27,41	3,40	-	-
	91 dias	50,43	27,87	3,56	-	-
	413 dias	58,95	28,74	4,05	-	-
	18 anos	69,86	31,60	-	64,00	40,62
Seixo 0,50	7 dias	17,92	20,95	2,66	-	-
	28 dias	30,30	24,24	2,86	-	-
	91 dias	34,87	24,72	2,64	-	-
	413 dias	35,61	26,36	3,68	-	-
	18 anos	45,10	28,30	3,61	59,00	37,41
Seixo 0,70	7 dias	13,12	17,99	1,15	-	-
	28 dias	16,24	20,30	1,92	-	-
	91 dias	17,76	20,83	1,94	-	-
	413 dias	20,29	23,67	2,11	-	-
	18 anos	26,30	20,30	-	45,00	36,05
CALCÁRIO 0,35	7 dias	42,91	29,18	3,87	-	-
	28 dias	51,61	31,87	4,47	-	-

Tabela 4.1 – Resultados médios de concretos no estado endurecido.

CONCRETOS	Idade	Resistência a Compressão (MPa)	Módulo de deformação (GPa)	Resistência a Tração (MPa)	(conclusão)	
					Resistência Estimada por Esclerometria (MPa)	Módulo de deformação dinâmico (GPa)
CALCÁRIO 0,35	91 dias	59,09	32,64	4,36	-	-
	413 dias	65,45	34,78	5,37	-	-
	18 anos	70,60	36,20	5,48	58,00	50,44
CALCÁRIO 0,50 200 mm	7 dias	24,73	24,64	2,78	-	-
	28 dias	29,47	28,11	3,13	-	-
	91 dias	32,35	29,65	3,16	-	-
	413 dias	42,02	30,19	4,05	-	-
	18 anos	44,70	29,70	3,94	51,00	42,55
CALCÁRIO 0,50 110 mm	7 dias	26,87	26,85	2,63	-	-
	28 dias	35,12	28,21	3,52	-	-
	91 dias	35,22	29,40	3,05	-	-
	413 dias	48,51	33,68	4,30	-	-
	18 anos	49,60	29,80	3,80	50,00	43,01
CALCÁRIO 0,50 20 mm	7 dias	28,82	27,82	3,08	-	-
	28 dias	37,04	29,31	3,53	-	-
	91 dias	42,10	31,07	3,59	-	-
	413 dias	46,73	33,77	4,38	-	-
	18 anos	49,20	31,30	3,77	48,00	43,89
CALCÁRIO 0,70	7 dias	15,33	22,18	1,92	-	-
	28 dias	19,90	25,44	2,40	-	-
	91 dias	21,34	26,62	2,47	-	-
	413 dias	20,04	28,12	2,48	-	-
	18 anos	23,30	20,80	2,33	36,00	37,60
BASALTO 0,35	7 dias	32,33	35,88	3,31	-	-
	28 dias	40,82	41,22	3,40	-	-
	91 dias	43,27	40,81	4,32	-	-
	413 dias	66,72	44,73	5,50	-	-
	18 anos	70,71	40,10	5,23	67,00	48,56
BASALTO 0,50	7 dias	23,87	32,36	2,72	-	-
	28 dias	30,25	34,64	3,13	-	-
	91 dias	36,70	39,03	3,56	-	-
	413 dias	43,61	40,11	4,69	-	-
	18 anos	48,40	31,80	4,00	51,00	44,81
BASALTO 0,70	7 dias	14,14	26,79	1,93	-	-
	28 dias	17,93	29,37	2,29	-	-
	91 dias	21,26	33,25	2,60	-	-
	413 dias	24,03	33,56	3,19	-	-
	18 anos	30,50	26,50	3,14	33,00	37,52

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4.2 – Resultados médios de módulo de deformação estático em GPa.

Tipo de Agregado	Idade	BASALTO	CALCÁRIO			SEIXO
Abatimento		110 mm	20 mm	110 mm	200 mm	110 mm
a/c = 0,35	7 dias	35,88	-	29,18	-	24,38
	28 dias	41,22	-	31,87	-	27,41
	91 dias	40,81	-	32,64	-	27,87
	413 dias	44,73	-	34,78	-	28,74
	18 anos	40,10	-	36,20	-	31,60
a/c = 0,50	7 dias	32,36	27,82	26,85	24,64	20,95
	28 dias	34,64	29,31	28,21	28,11	24,24
	91 dias	39,03	31,07	29,40	29,65	24,72
	413 dias	40,11	33,77	33,68	30,19	26,36
	18 anos	31,80	31,30	29,80	29,7	28,30
a/c = 0,70	7 dias	26,79	-	22,18	-	17,99
	28 dias	29,37	-	25,44	-	20,30
	91 dias	33,25	-	26,62	-	20,83
	413 dias	33,56	-	28,12	-	23,67
	18 anos	26,50	-	20,80	-	20,30

Fonte: Próprio Autor.

Nos trabalhos anteriores foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para determinar a significância das variáveis selecionadas nos resultados de módulo de deformação do concreto. Foi adotado nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$), Silva, K. (2003, p.38) baseado em Gomes (1982) e Nanini e Ribeiro (1987), diz que:

“O uso da análise de variância na comparação de grupos está baseado na relação da variabilidade dos resultados dentro dos grupos e da variabilidade das médias entre os grupos, e na distribuição de Fischer (F), com o nível de significância α .”

Esta análise concluiu que todas as quatro variáveis escolhidas, tipo de agregado, relação a/c, idade e abatimento, são significantes de forma independente até 413 dias de idade. Porém a combinação delas só apresenta significância quando a variável “tipo de agregado” é combinada com apenas uma das outras. A variável tipo de agregado foi a mais significativa na análise.

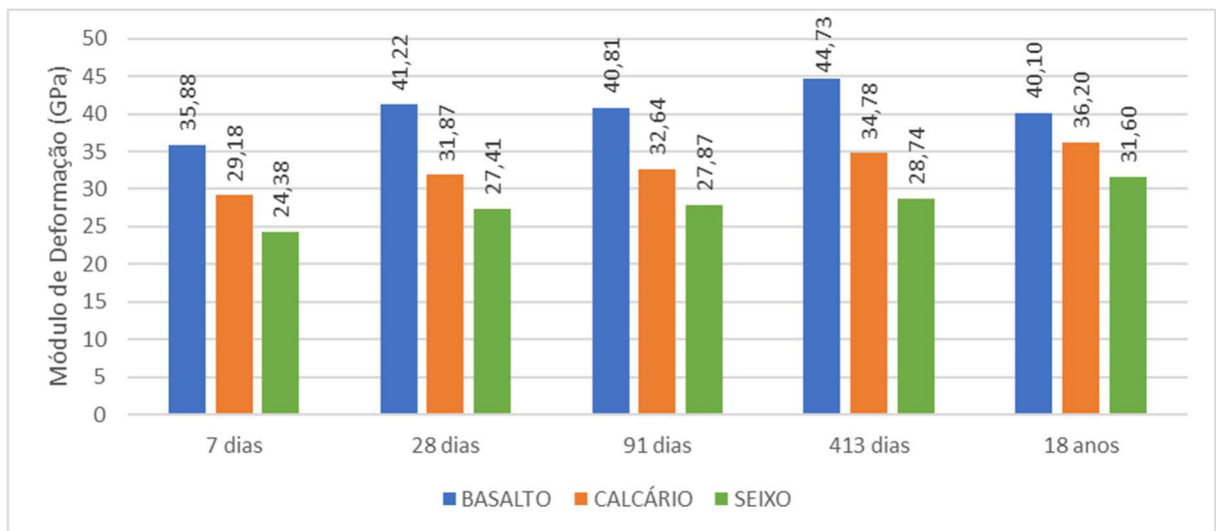
4.1 ANÁLISE DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO

A seguir são apresentadas as análises de cada variável estudada e sua influência sobre o módulo de deformação.

4.1.1 Tipo de Agregado

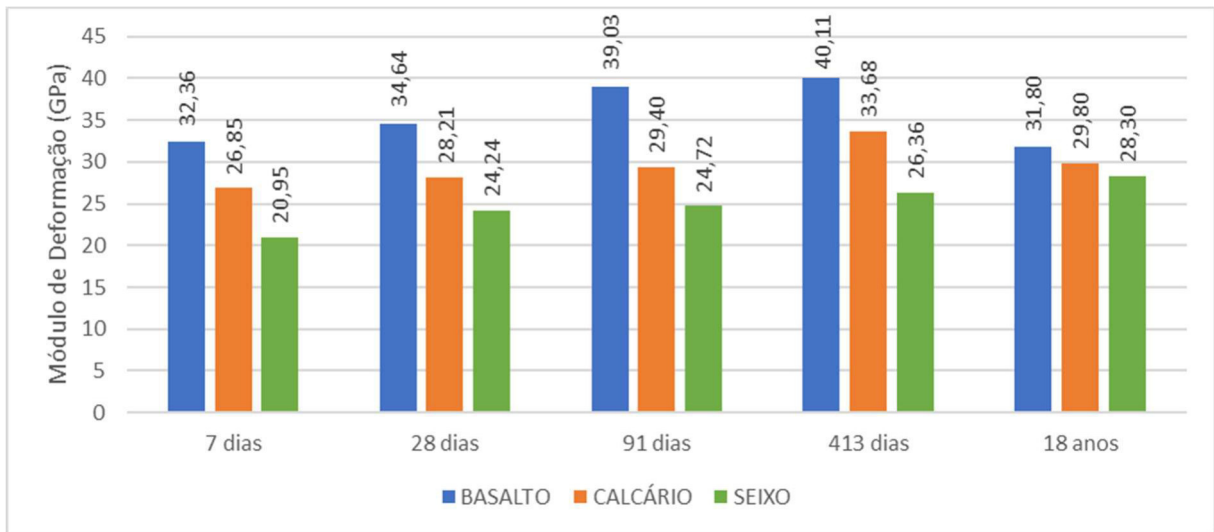
A análise de variância realizada por Silva, K. (2003) comprovou a significância do tipo de agregado até os 413 dias de idade. Os resultados dos ensaios aos 18 anos, mantiveram o comportamento entre os grupos, apesar de não apresentarem valores semelhantes ao esperado, como pode ser observado nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

Figura 4.1 – Módulo de deformação para concretos com a/c = 0,35.



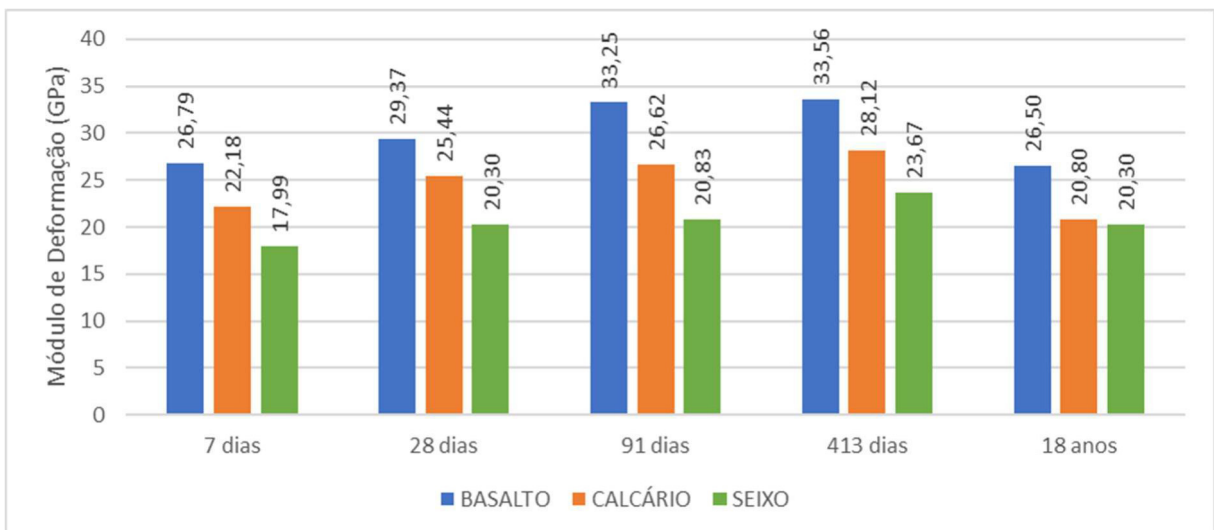
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.2 – Módulo de deformação para concretos com $a/c = 0,50$.



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.3 – Módulo de deformação para concretos com $a/c = 0,70$.



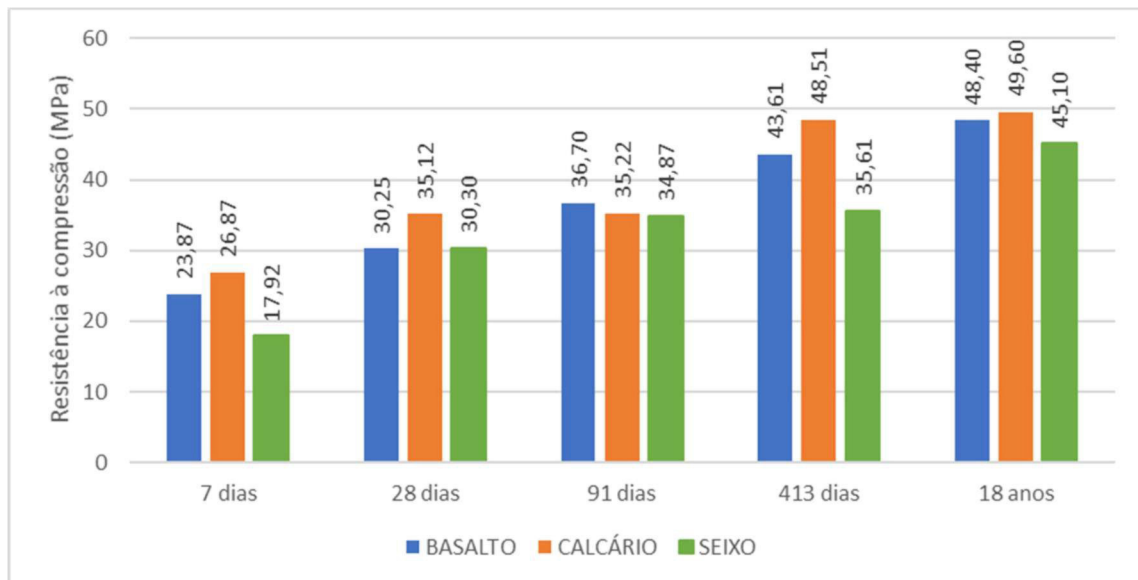
Fonte: Próprio Autor

Assim como observado anteriormente por Costa e Prado (2001) e por Silva, K. (2003) em ensaios com estes materiais e também evidenciado por Alhadad (2008) com agregados da mesma classificação mineralógica, os concretos produzidos com basalto mantiveram o maior valor dentre os três tipos de agregado, com os concretos produzidos com seixo obtendo os menores resultados.

Quando analisados os resultados de resistência à compressão (Figura 4.4), podemos verificar que o tipo de agregado não gera o mesmo comportamento nesta

propriedade. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o agregado pode influir na resistência apenas no caso de agregados leves altamente porosos, como pedra pomes e argila expandida, que podem reduzi-la.

Figura 4.4 – Resistência à compressão de concretos com fator $a/c = 0,50$.

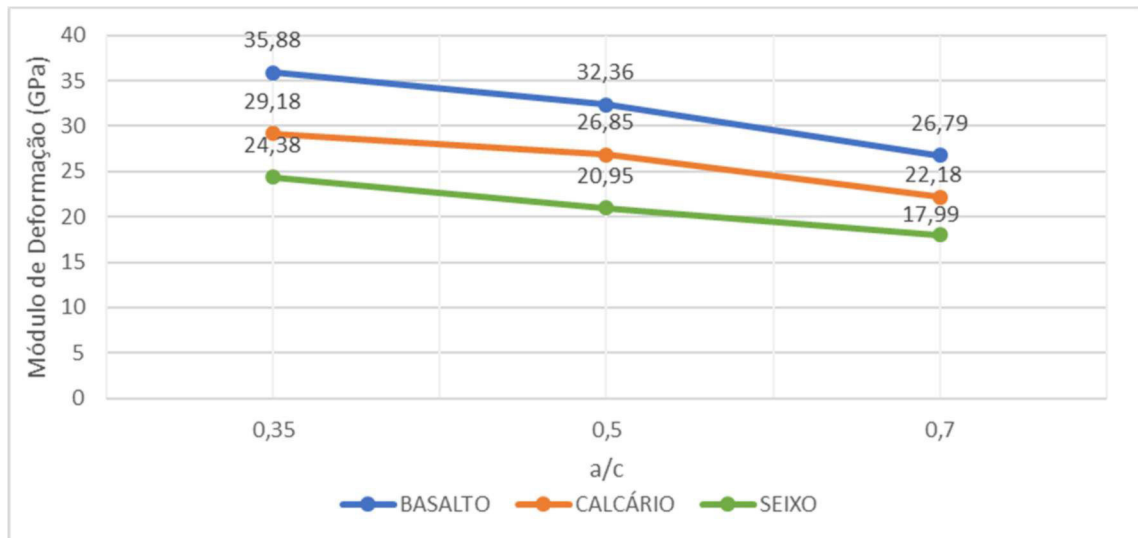


Fonte: Próprio Autor

4.1.2 Relação água/cimento

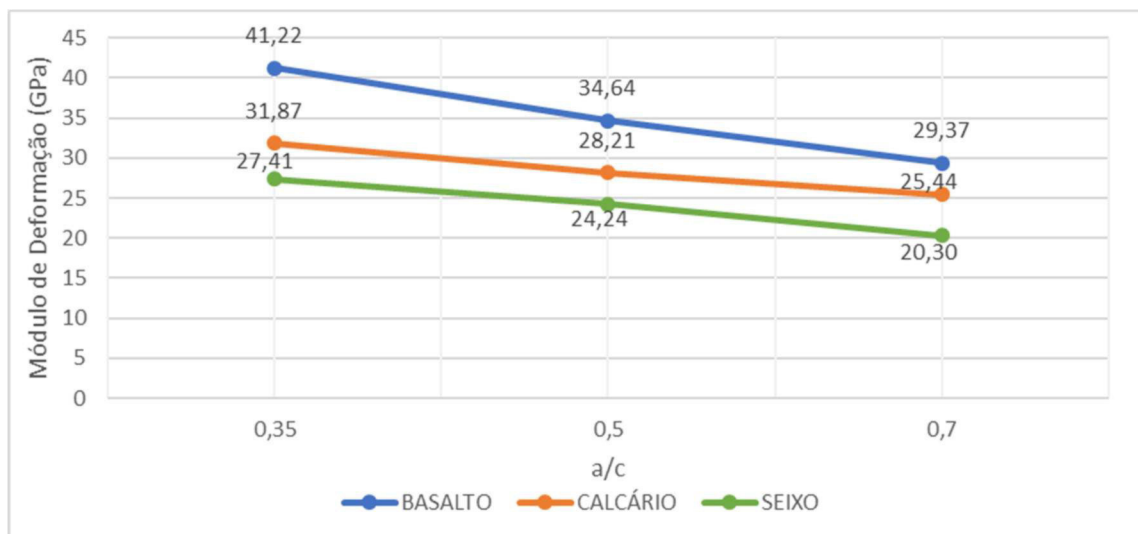
A significância da variável água/cimento também foi comprovada pela análise estatística realizada por Silva, K. (2003) até os 413 dias de idade. A diminuição do módulo com o aumento desta variável continuou sendo apresentado aos 18 anos de idade conforme as Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Figura 4.5 – Módulo de deformação de concretos aos 7 dias de idade.



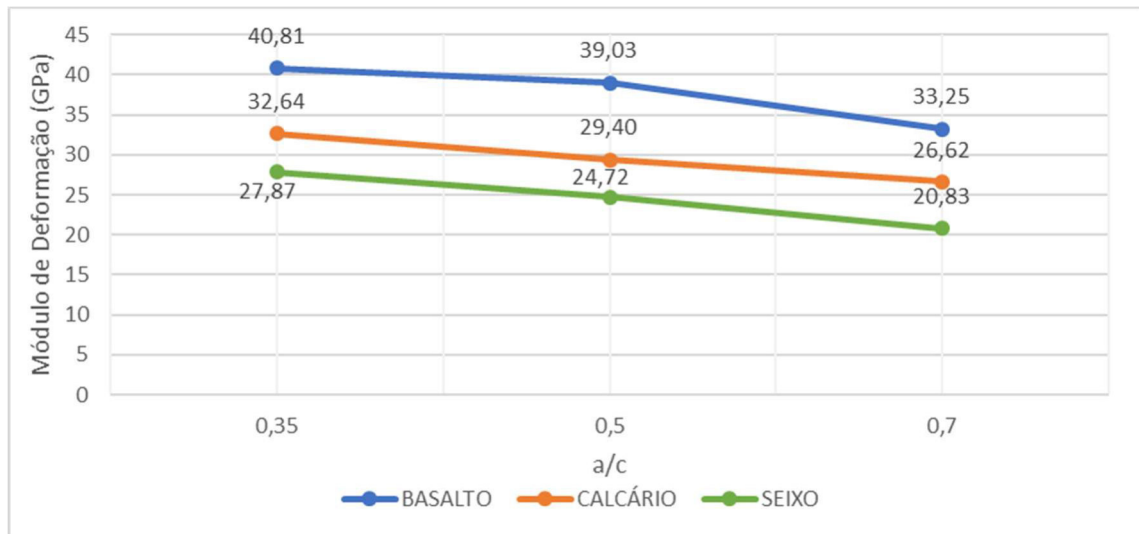
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.6 – Módulo de deformação de concretos aos 28 dias de idade.



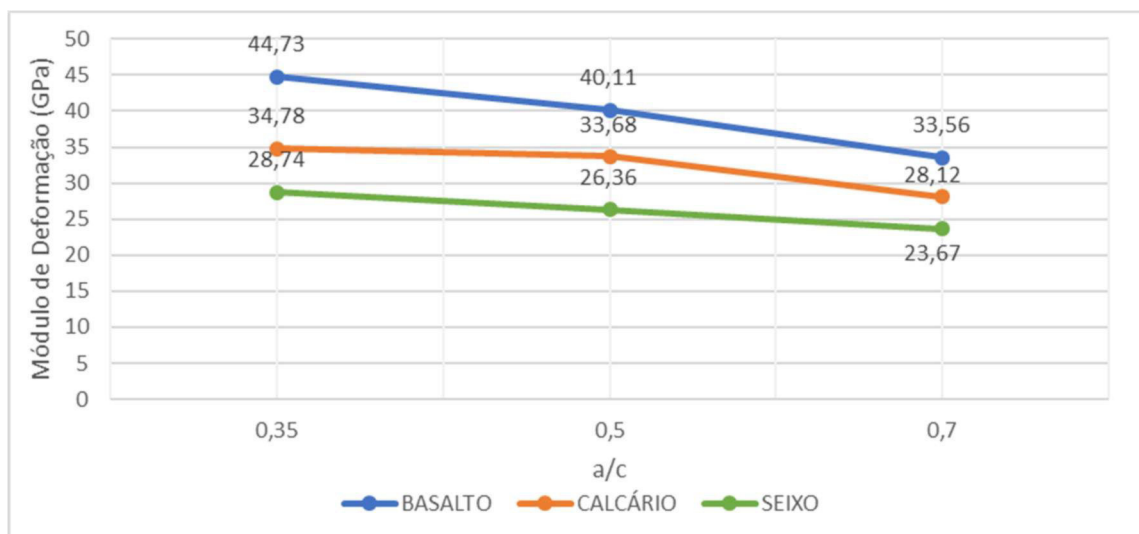
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.7 – Módulo de deformação de concretos aos 91 dias de idade.



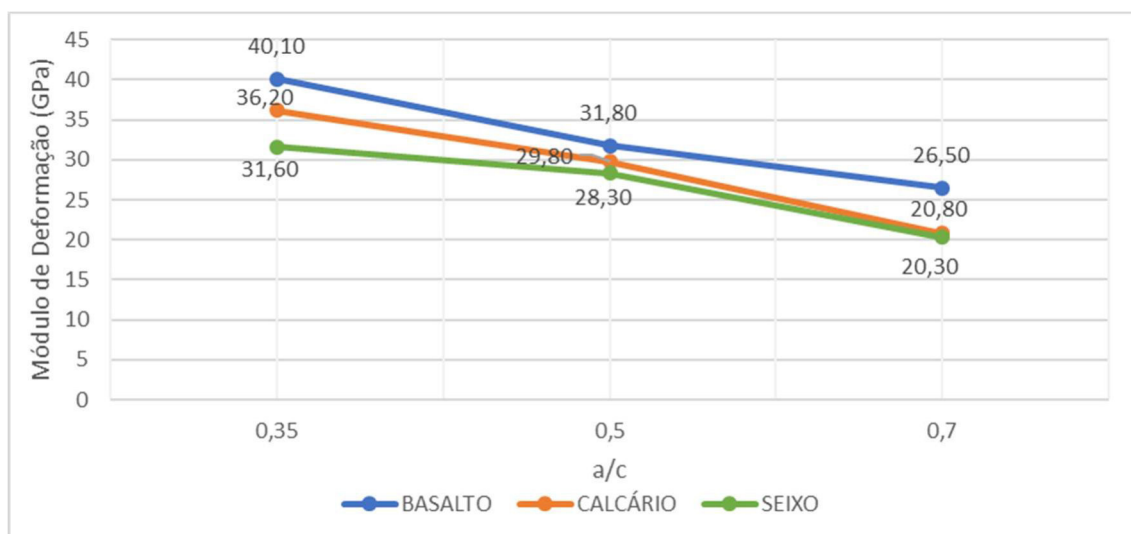
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.8 – Módulo de deformação de concretos aos 413 dias de idade.



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.9 – Módulo de deformação de concretos aos 18 anos de idade.



Fonte: Próprio Autor

O módulo de elasticidade foi reduzido com o aumento da relação água/cimento como esperado a partir dos conhecimentos da literatura. Silva, K. (2003) e Costa e Prado (2001) haviam observado estas reduções aos 91 e 413 dias, com reduções de 20 a 30% aos 91 dias e de 17 a 28% aos 413, quando comparados concretos com 0,35 e 0,70 de a/c. Aos 18 anos de idade estas reduções estão entre 34 e 43%.

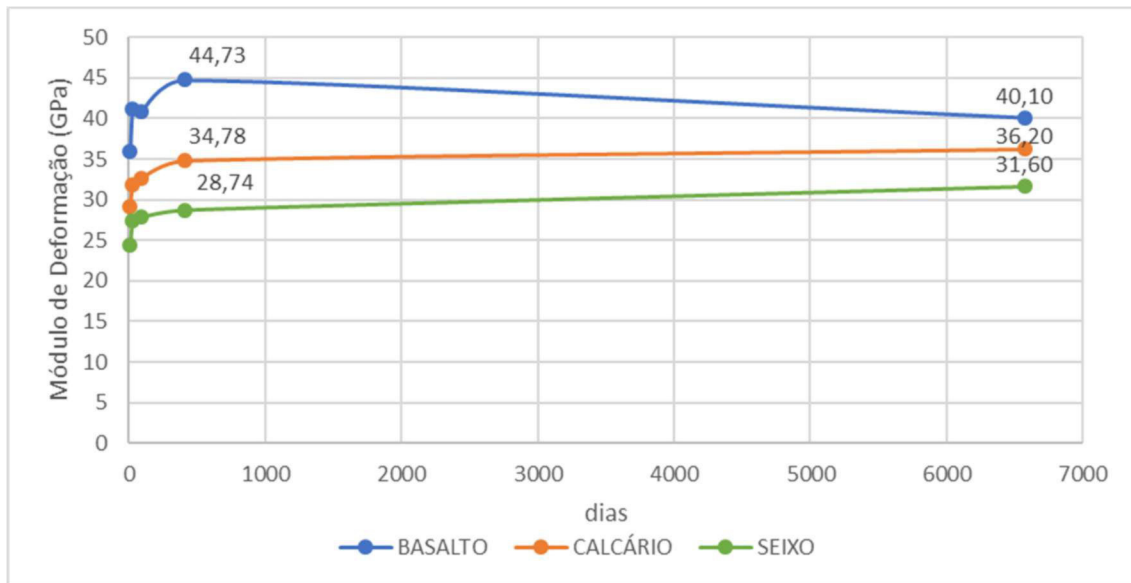
A resistência à compressão também é afetada pelo aumento do fator água/cimento, mas em uma escala maior. A redução de resistência à compressão, quando aumentada de 0,35 a 0,70 a relação a/c, chega a quase 70% nesta família de concretos aos 18 anos de idade.

O aumento da relação a/c gera um concreto mais poroso, o que prejudica suas propriedades. Além de reduções nas suas resistências tanto à ruptura quanto a variações dimensionais, o concreto também perde em durabilidade. Tal prejuízo em durabilidade pode explicar o aumento na diferença dos valores de módulos de elasticidade entre os concretos com diferentes relações a/c depois de 18 anos.

4.1.3 Idade

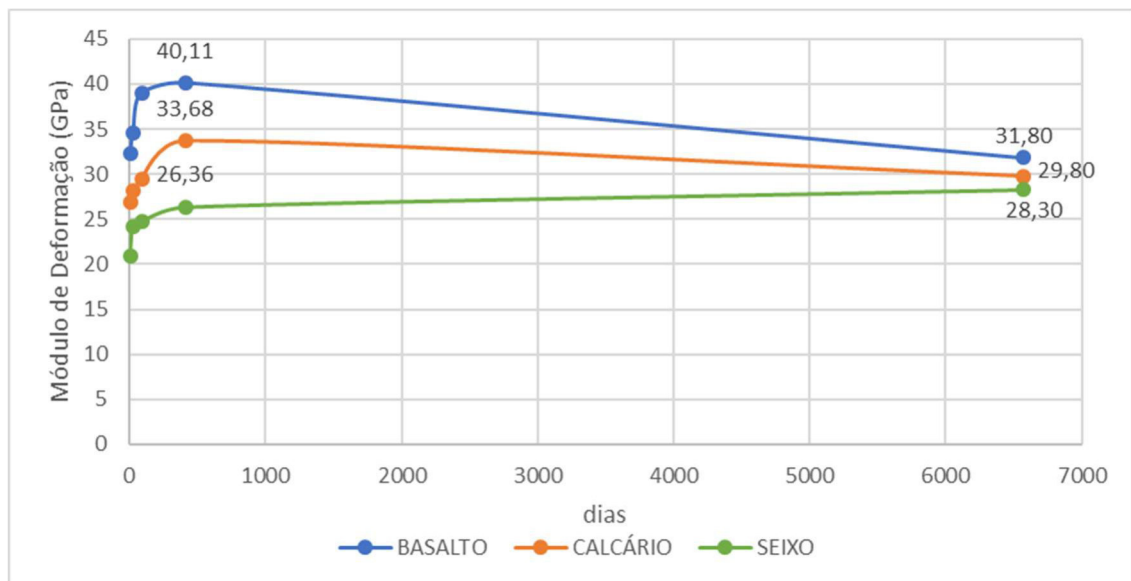
As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os resultados encontrados para o módulo de deformação para cada tipo de agregado ao longo de 18 anos.

Figura 4.10 – Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,35$.



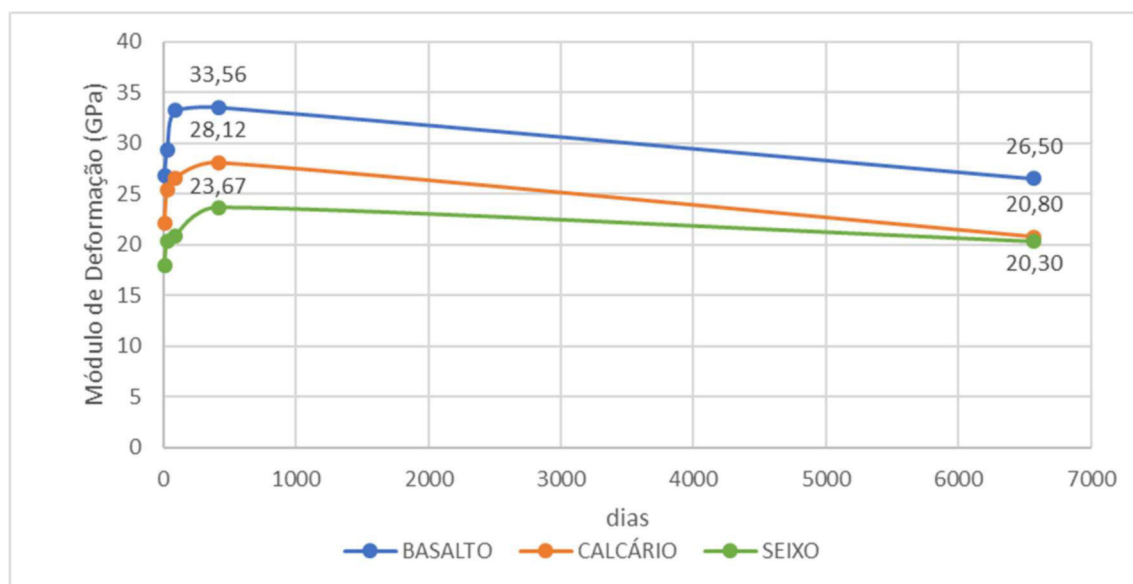
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.11 – Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,50$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.12 – Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,70$.



Fonte: Próprio autor.

Costa e Prado (2001) observaram que aos 7 dias o módulo possuía valor entre 85 e 95% dos valores apresentados aos 28 dias, com pouco aumento até os 91 dias exceto para o agregado basalto, que teve aumentos de até 13% entre 28 e 91 dias nos concretos com a/c de 0,50 e 0,70. Silva, K. (2003) observou que o aumento entre 91 e 413 dias variou de 1 a 14%. As análises de variância indicaram significância para esta variável, com 3 grupos distintos.

Aos 18 anos, foi observada uma queda para a maioria dos resultados o que não condiz com o esperado. A literatura indica que com o aumento do grau de hidratação e a posterior formação de material cristalino na zona de transição, o concreto tende a ter um desempenho superior (Mehta e Monteiro, 2008), ao contrário dos corpos de prova ensaiados.

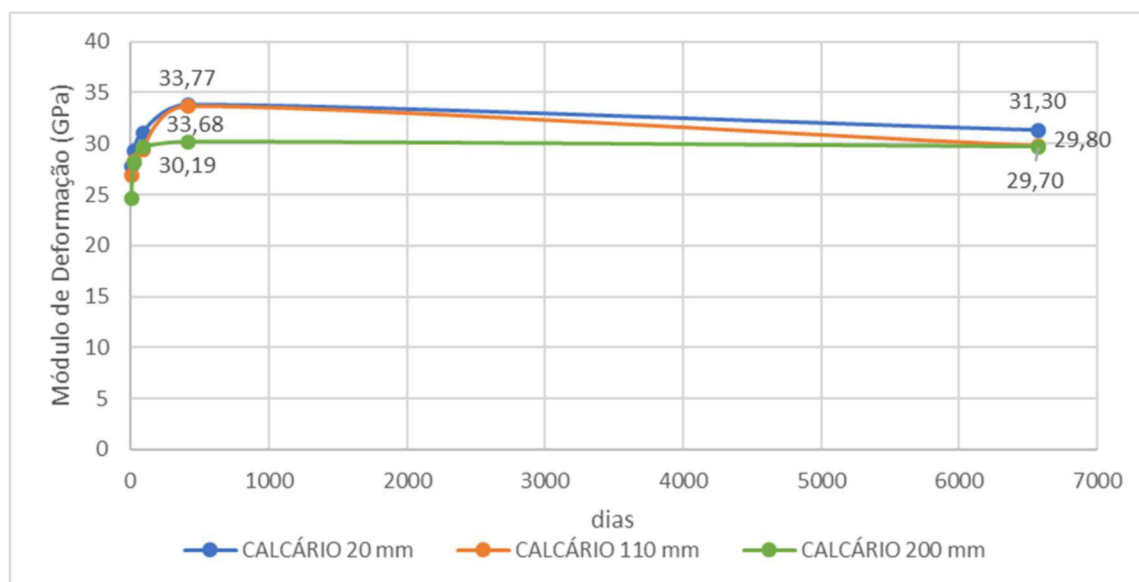
4.1.4 Abatimento

Para esta variável foram confeccionados concretos com agregado calcário e a/c fixo de 0,50. A figura 4.13 apresenta os resultados de módulo até 18 anos de idade.

Nas idades até 91 dias, o concreto com abatimento de 110 mm acompanha os resultados de módulo do concreto com abatimento de 200 mm, com o amadurecimento do concreto, aos 413 dias o concreto com 110 mm se iguala ao de

20 mm. Aos 18 anos, com as perdas registradas nas propriedades registradas anteriormente, o concreto de 110 mm teve queda maior que os outros e novamente se igualou ao concreto com abatimento de 200 mm.

Figura 4.13 – Módulo de deformação de concretos com $a/c = 0,50$.



Fonte: Próprio autor.

Melo Neto e Helene (2002) afirmam que com uma relação a/c constante, a redução do abatimento levará a um aumento no teor de agregados, o que eleva o módulo de elasticidade devido ao agregado graúdo ter módulo superior ao da pasta. Nos corpos de prova ensaiados não foi possível constatar este efeito.

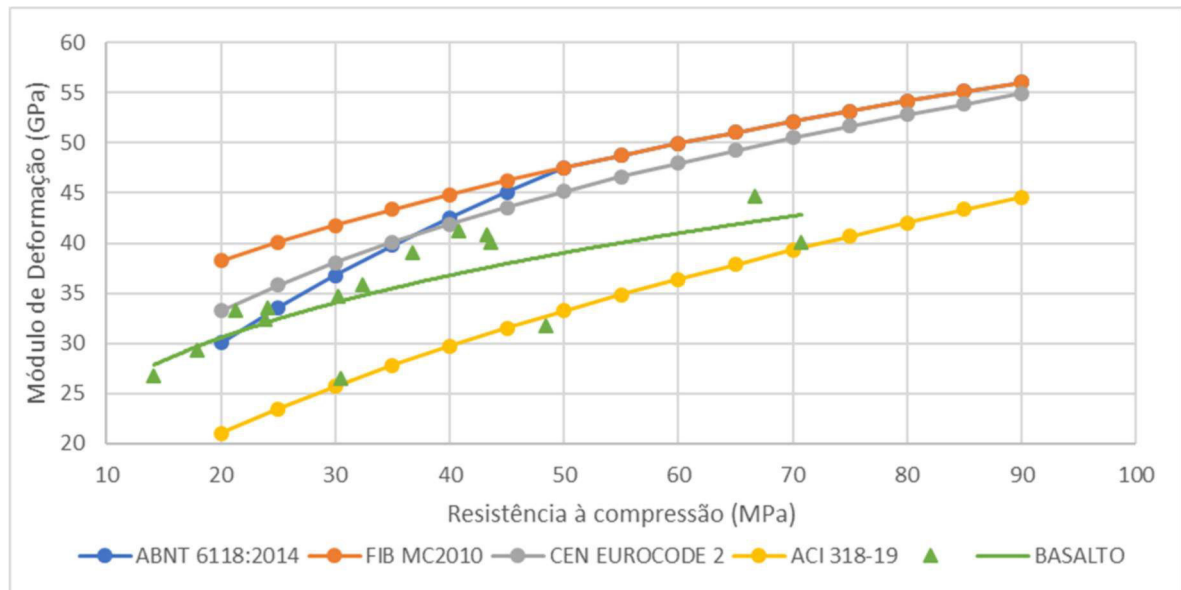
4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM AS EQUAÇÕES PROPOSTAS PELAS NORMAS

Nas Figuras 4.14, 4.15 e 4.16, são apresentados os resultados de módulo de deformação tangente inicial obtidos aos 18 anos em relação a resistência à compressão atingida pelos concretos comparados com os resultados das equações propostas pelas normas em vigência apresentadas anteriormente neste trabalho.

A equação proposta pela ACI 318-19 (2019) não leva em conta o tipo de agregado graúdo utilizado no concreto, porém já estabelece um valor menor que o

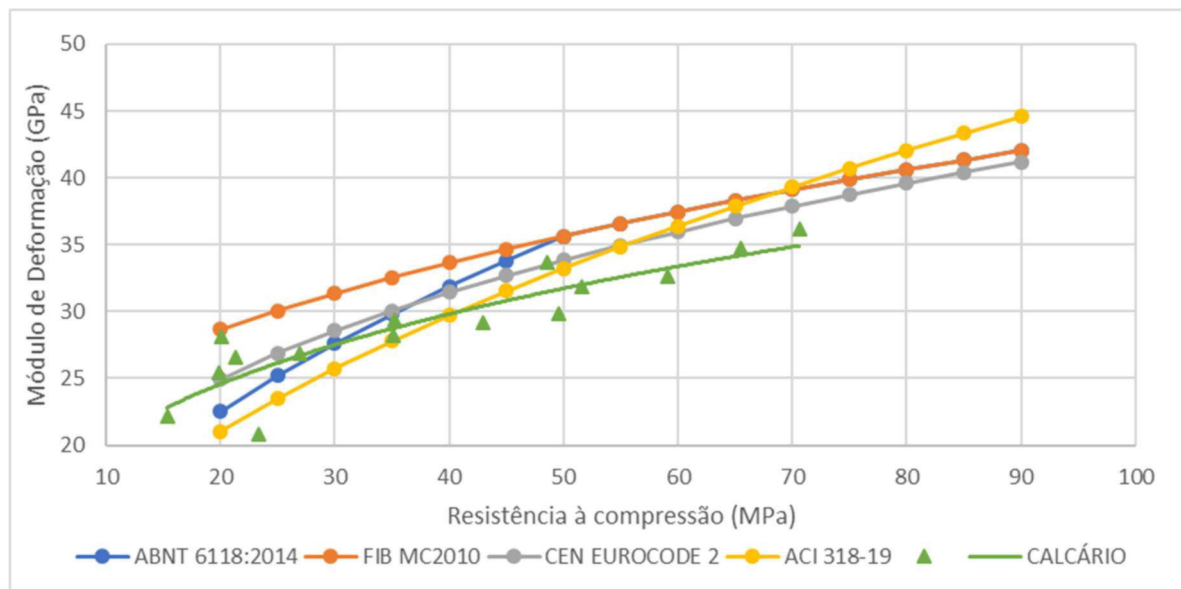
estabelecido pelas outras normas para agregados quartzítico, adotado como agregado padrão para o Eurocode 2 (CEN, 2004), e com coeficiente α_E igual a 1,0 na NBR 6118 (ABNT, 2014) e no Model Code 2010 (FIB, 2010).

Figura 4.14 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com basalto.



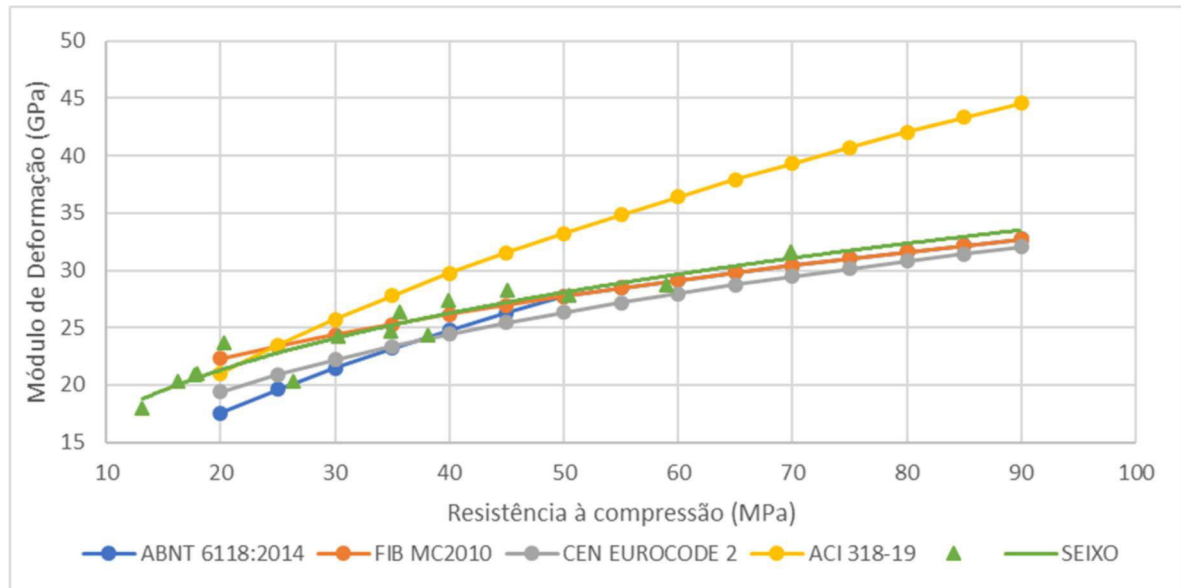
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.15 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com calcário.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.16 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com seixo.



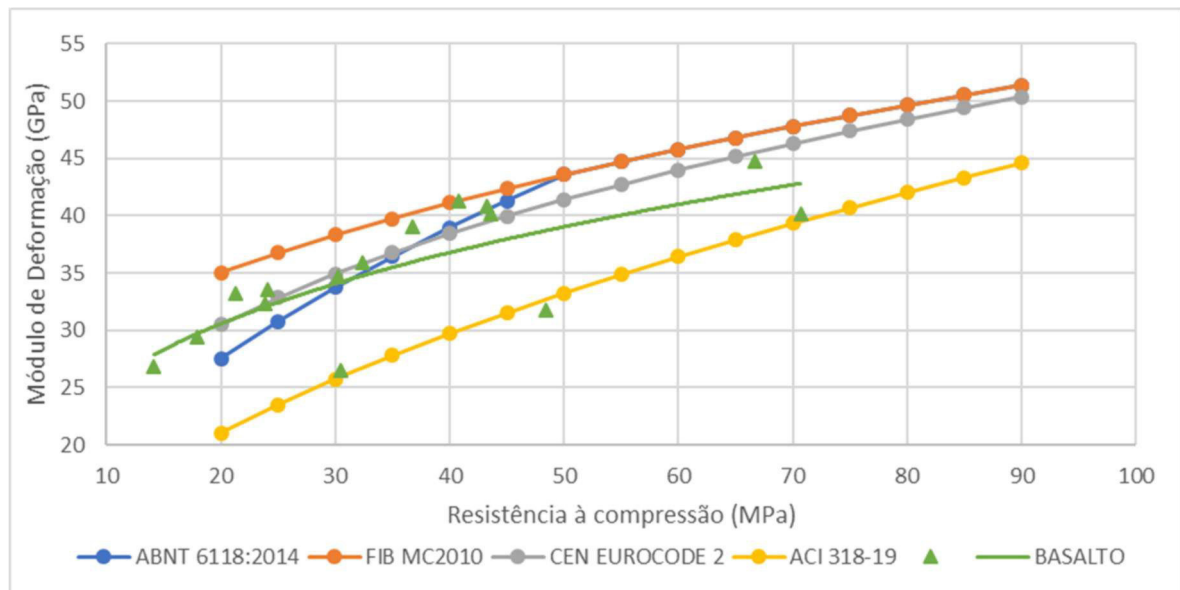
Fonte: Próprio autor.

A falta dessa consideração faz com que o módulo seja subdimensionado pela norma Norte americana quando utilizados agregados de alta resistência, como basalto e dolomito, e fique superdimensionado no caso de agregados mais porosos como arenito e o seixo.

O Basalto obteve resistência maior que o estimado pelo ACI 318-19, porém ainda abaixo do que é estimado pelas outras normas que corrigem o valor de acordo com o agregado. Silva, K. (2003) sugeriu que o valor do coeficiente α_E para o basalto fosse alterado para 1,1, gerando uma maior correspondência com os resultados obtidos dos ensaios como pode ser observado na Figura 4.17. A equação nesta análise que melhor se encaixou à linha de tendência dos valores médios foi a do Eurocode 2 (CEN, 2004).

Para o calcário, os valores apresentados por todas as normas foram bem próximos, pouco maiores que os obtidos através dos ensaios. A equação que melhor se adequou aos resultados ensaiados foi também o Eurocode 2, porém em resistências mais altas os resultados ensaiados foram menores que os estimados. Isso pode ser devido à queda dos valores de módulo encontrados pelos ensaios.

Figura 4.17 – Relação entre módulo de deformação e resistência à compressão para concreto confeccionado com basalto e $\alpha_E = 1,1$.



Fonte: Próprio autor.

Para o seixo, foi utilizado o valor de correção da natureza do agregado arenito, pois o seixo não está incluído em nenhuma norma. As equações com esta correção tiveram uma boa correspondência com os resultados dos ensaios, a maior aderência foi com a equação do Model Code 2010 (FIB, 2010).

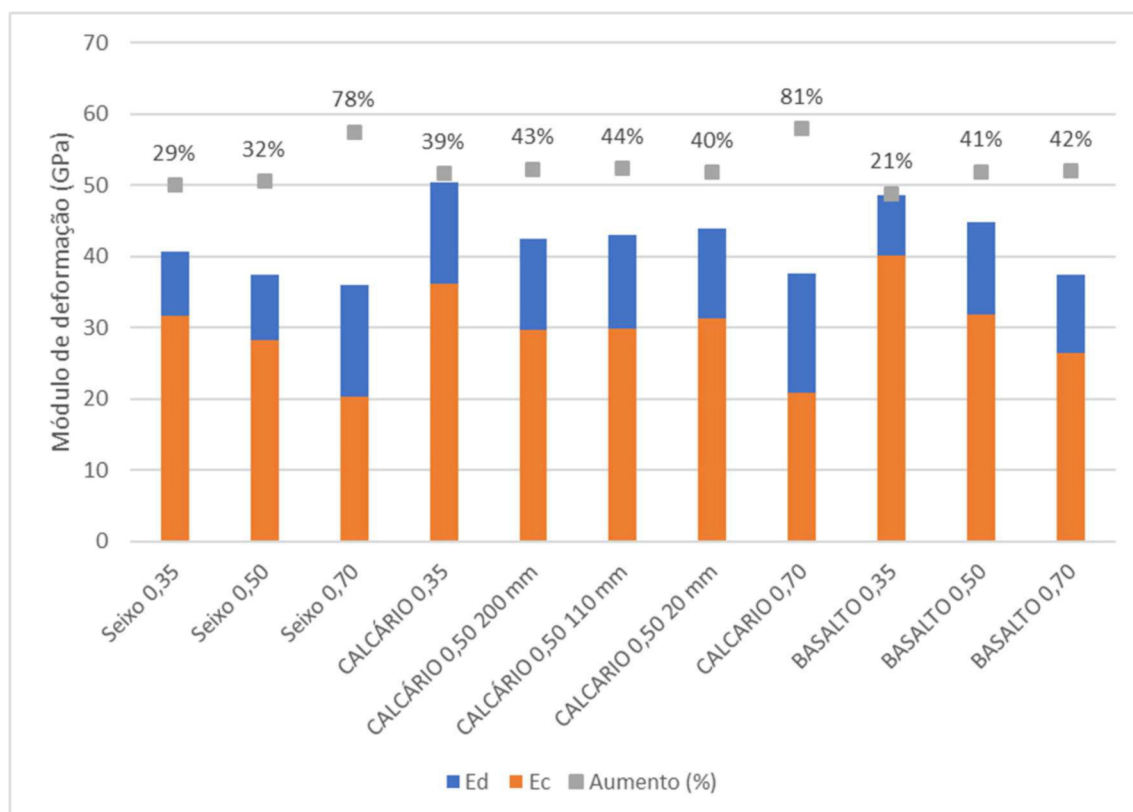
4.3 COMPARAÇÃO ENTRE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

O módulo de elasticidade dinâmico foi calculado através dos resultados do ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica realizado de acordo com a NBR 8802 (ABNT, 2019) utilizando-se da equação constante nas normas NBR 15630 e ASTM C-597 (ASTM, 2016). A Figura 4.18 apresenta os resultados e a proporção que representa o aumento entre o módulo dinâmico e o estático.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os resultados de módulo de deformação dinâmico são de 20 a 30% maiores que os do módulo de elasticidade estático tangente inicial, sendo maiores em concretos de menor resistência. Bilesky (2016) encontrou em seus ensaios um aumento em média de 13% em concretos de

menor resistência e 5% em concretos de alta resistência produzidos com diferentes agregados graúdos.

Figura 4.18 – Módulo de deformação estático e dinâmico.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados encontrados neste trabalho mostraram aumento mais consideráveis para o módulo de deformação dinâmico, porém os resultados de módulo de deformação estático foram abaixo do esperado, o que pode explicar essa diferença. Tais resultados podem ter sido causados por armazenamento inadequado destes corpos de prova, que não foram supervisionados durante maior parte destes 17 anos. A exposição a intempéries e altos gradientes de temperatura podem ter degradado o concreto. Outra possibilidade seria a realização de ensaios em corpos de prova que haviam sido submetidos a ensaios de módulo de deformação nos trabalhos anteriores.

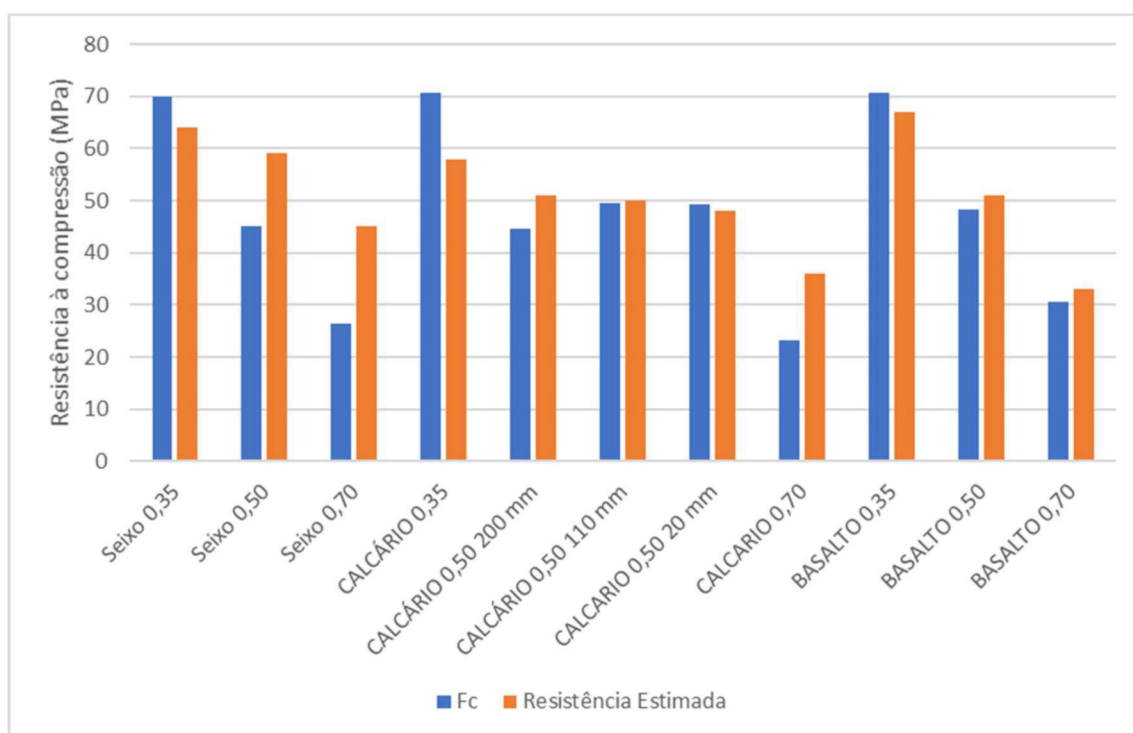
Os concretos de maior resistência, com a/c menor obtiveram taxas menores de aumento nos valores de módulo dinâmico, comportamento de acordo com a literatura.

Os concretos com variação no abatimento, que leva a diferentes teores de agregado graúdo na mistura, não demonstraram diferenças consideráveis no módulo de elasticidade dinâmico, o que não corrobora as ideias apresentadas por Mehta e Monteiro (2008) e Bilesky (2016) que afirmam que a fração volumétrica de agregado graúdo exerce grande influência sobre o módulo de deformação dinâmico.

4.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ESTIMADA PELO ESCLERÔMETRO DE REFLEXÃO

Na Figura 4.19 é trazida a comparação entre as resistências estimadas pelo ensaio de esclerometria, utilizando-se das curvas de conversão disponíveis no manual do equipamento, e os resultados obtidos dos ensaios de ruptura dos corpos de prova aos 18 anos de idade.

Figura 4.19 – Resistência à compressão ensaiada e estimada.



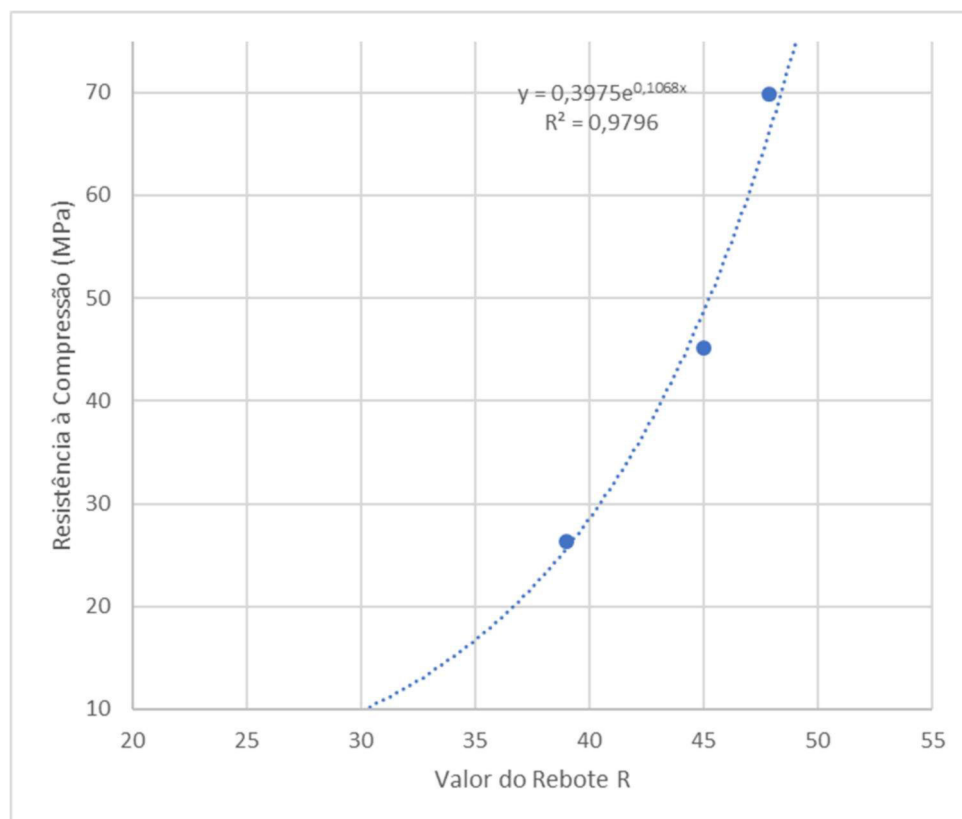
Fonte: Próprio autor.

Pode-se observar que os resultados de resistência à compressão estimados para os concretos confeccionados com agregado graúdo de basalto foram bem

representativos da realidade. Os traços de Calcário de resistência média também foram bons, porém para resistência alta e baixa não se encaixaram. Nos traços de seixo, apenas o de maior resistência à compressão, obteve valor estimado próximo aos valores ensaiados.

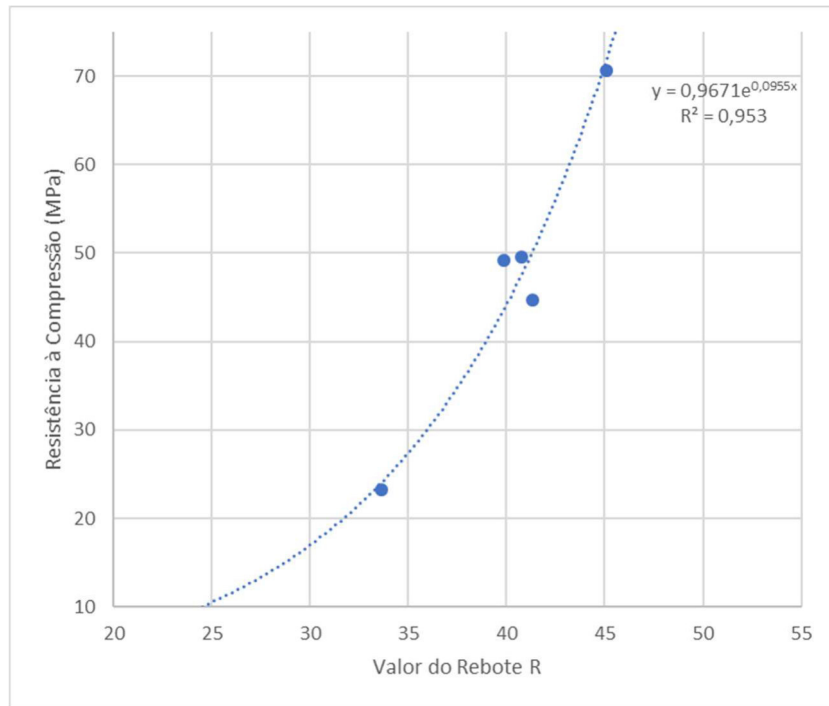
Para melhores resultados nestas estimativas, é ideal que seja realizado um estudo mais extenso, com diversas faixas de resistência para cada combinação de materiais utilizados e então poderiam ser confeccionadas curvas de conversão mais adequadas, para cada faixa de idade, através dos resultados de índice esclerométrico (ou rebote R) cruzados com as resistências à compressão medidas através do ensaio de compressão axial. As Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 demonstram como seriam as curvas de conversão para os concretos analisados neste trabalho aos 18 anos de idade.

Figura 4.20 – Curva de conversão entre índice esclerométrico e Resistência à compressão para agregado graúdo de seixo.



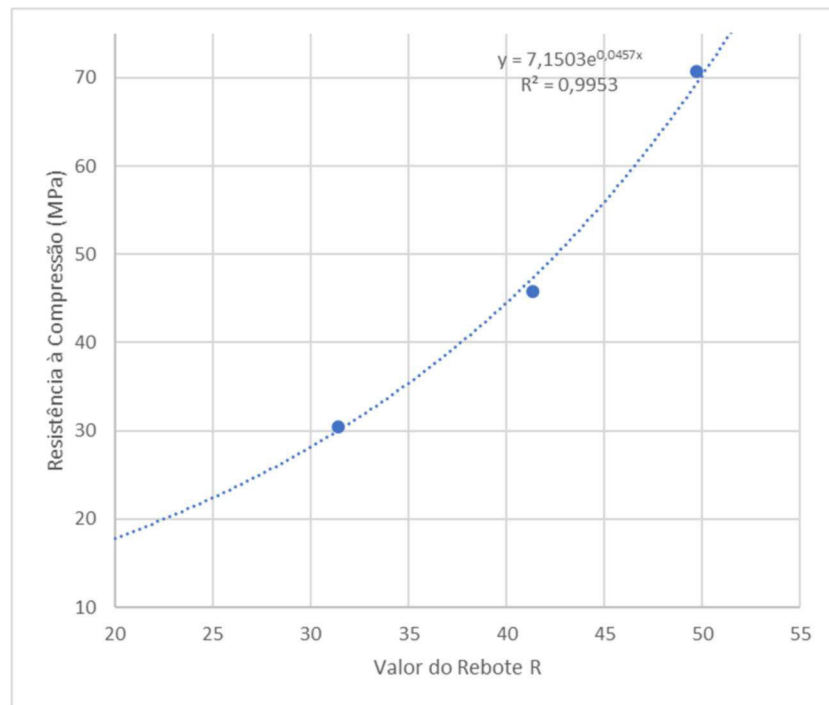
Fonte: Próprio autor.

Figura 4.21 – Curva de conversão entre índice esclerométrico e Resistência à compressão para agregado graúdo de calcário.



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.22 – Curva de conversão entre índice esclerométrico e Resistência à compressão para agregado graúdo de basalto.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o comportamento do módulo de deformação de concretos aos 18 anos de idade, foi analisada a influência dos diferentes tipos de agregados graúdos com os quais foram confeccionados, além da influência do fator água/cimento, abatimento e idade, sendo comparados os atuais resultados com outros medidos aos 7, 28, 91 e 413 dias de idade.

O tipo de agregado graúdo foi a variável mais significativa nas análises de variância realizadas por Costa e Prado (2001) e Silva, K. (2003). Com 18 anos de idade o comportamento do módulo de deformação foi mantido, com os concretos confeccionados com o basalto obtendo os maiores valores de módulo de deformação, seguido pelos concretos confeccionados com calcário, e os concretos confeccionados com seixo obtiveram os menores valores.

O aumento da relação água/cimento também foi considerado significativo nas análises de variância aos 413 dias de idade. O comportamento do módulo de deformação também foi mantido aos 18 anos, apresentando ainda um aumento na diferença dos valores entre as diferentes relações água/cimento, chegando a 70% de diferença quando comparados concretos com relação a/c de 0,35 com os de 0,70. Este fato pode ser devido à alta porosidade de concretos com maior teor de água, prejudicando além das suas características físicas, a sua durabilidade.

A variável abatimento se mostrou a menos confiável neste estudo. A análise de variância mostrou significância desta variável aos 413 dias de idade, com a formação de dois grupos distintos, um grupo contendo os concretos de 20 e 110 mm de abatimento e outro com o traço de 200 mm de abatimento. Aos 18 anos de idade o concreto com 110 mm obteve resultado mais próximo ao de 200 mm, com uma queda maior que os demais.

O estudo acerca do efeito da idade no módulo de deformação não alcançou os resultados esperados. A literatura indica uma evolução das características do concreto ao longo do tempo devido ao aumento do grau de hidratação da pasta e a formação de cristais na zona de transição (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Os ensaios realizados nos corpos de prova aos 18 anos de idade, demonstraram resultados inferiores na maioria dos traços, com alguns obtendo valores menores que os obtidos aos 28 dias.

Tal comportamento nos valores do módulo de deformação pode ser atribuído à degradação dos corpos de prova causada por armazenamento inadequado. Apesar

de estarem acomodados no Laboratório de Materiais de Construção do Campus Goiânia, estes não foram supervisionados constantemente. Concretos sujeitos a intempéries e altos gradientes de temperatura poderiam ter suas propriedades comprometidas. Esta falta de supervisão também pode justificar a disponibilidade de corpos de prova em quantidade diferente para cada traço.

Outro motivo para os baixos valores de módulo de deformação pode ser a realização de ensaios de módulo estático de deformação tangente inicial em corpos de prova que haviam sido ensaiados nos estudos anteriores de Costa e Prado (2001) e Silva, K. (2003). Ensaios sucessivos podem trazer valores reduzidos devido ao aumento das microfissuras no concreto. Alguns corpos de prova continham sinais das marcações efetuadas para posicionamento dos extensômetros para o ensaio de módulo de deformação, porém essas indicações não permaneceram visíveis depois de tanto tempo. Ainda assim, tais marcações não garantem que os corpos de prova foram ensaiados.

A avaliação das equações para previsão do módulo de deformação a partir da resistência à compressão mostrou bons resultados, sendo necessário alguns ajustes dos fatores de correção para o tipo de agregado, principalmente pelo pequeno número de naturezas petrográficas descritas na norma. A equação da NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) se mostrou muito melhor adequada que as versões anteriores de 1978 e 2003.

Para aprofundamento de algumas questões levantadas neste trabalho, sugere-se alguns temas:

- a) Realizar outro estudo de comportamento de propriedades ao longo do tempo, com maior número de corpos de prova, para que possa ser realizada análises em mais idades;
- b) Estudar a influência do abatimento no módulo de deformação do concreto, para outros tipos de agregado e com a utilização de aditivos;
- c) Realizar estudos com mais tipos de agregados graúdos de várias regiões do Brasil e estabelecer valores para o índice de correção α_E , para os agregados não descritos na NBR 6118 (ABNT, 2014);
- d) Desenvolver diagramas de conversão entre índice esclerométrico e resistência à compressão para diferentes tipos de concreto utilizados no Brasil.

6 REFERÊNCIAS

ALHADAS, M. F. S.. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Building code requirements for structural concrete** (ACI 318-19). Farmington Hills: ACI, 2019.

_____. **In-place Methods to Estimate Concrete Strenght** (ACI 228.1R-03). Farmington Hills: ACI, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **C-597**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. W. Conshohoken: ASTM International, 2009.

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

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1978.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 7584:** Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 8802:** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BILESKY, P.; HELENE, P.; SBRIGHI NETO, C.; CASTRO, A. L.. Influência da natureza petrográfica do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto. In: 60 Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais do 60 CBC**. São Paulo: IBRACON, 2018.

BROOKS, J. J.. 30-year creep and shrinkage of concrete. In: **Magazine of Concrete Research**. Londres, v. 57, iss. 9, novembro 2005. Resumo disponível em <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/mac.2005.57.9.545>>. Acesso em 09/06/2019.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G.. **Testing in concrete structures**. 4 ed. New York: Taylor & Francis, 2006.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION – CEN. **Eurocode 2:** Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.

COSTA, A. C. M.; PRADO, P. P. F.. **Influência dos agregados graúdos do Estado de Goiás no módulo de deformação do concreto**. Monografia (Graduação) – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C.. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência, com e sem adições de microssílica**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. **Model code 2010**. Lausanne: FIB, 2010.

GOMIDE, T. L. F.; LIPORONI, A. S.; FERRARI NETO, A.. Ruptura de alvenaria por deformação estrutural. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias, 2003, Belo Horizonte. **Anais do XII CBEAP**. São Paulo: IBAPE, 2003.

MARTINS, D. G.. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia - GO**. Dissertação (Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3 ed. São Francisco: Mcgraw-Hill, 2008.

MELO NETO, A. A.; HELENE, P.. Módulo de elasticidade – Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: 44 Congresso Brasileiro do Concreto, 2002, Belo Horizonte. **Anais do 44 CBC**. São Paulo: IBRACON, 2002.

PACHECO, J.; BILESKY, P.; MORAIS, T. R.; GRANDO, F.; HELENE, P.. Considerações sobre o módulo de elasticidade do concreto. In: 56 Congresso Brasileiro do Concreto, 2014, Natal. **Anais do 56 CBC**. São Paulo: IBRACON, 2014.

PEDROSO, F. L.. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. In: **Revista Concreto 53** – IBRACON. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.ppd>. Acesso em: 26/11/2018.

PRADO, P. P. F.; FRANCINETE JÚNIOR, P.; COSTA, A. C. M.; SILVA, K. J.. Influência dos agregados graúdos do estado de goiás no módulo de deformação do concreto. In: 47 Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Olinda. **Anais do 47 CBC**. São Paulo: IBRACON, 2005.

PROCEQ S.A.. **Manual – Martelo de teste de concreto Original Schmidt** – modelos N/ L e NR/ LR. Schwerzenbach: Proceq, 2017.

SILVA, K. J.. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos, com um ano de idade, produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos.**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Coordenação da Área de Construção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia, 2003.

SILVA, R.R.. **Impacto das mudanças na norma NBR 6118 no dimensionamento de estruturas em concreto armado de edifícios.**

Trabalho de Diplomação – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VASCONCELOS, A.C.; GIAMMUSO, S.E.. **O misterioso módulo de elasticidade.**

Biblioteca Digital TQS, 2009. Disponível em: <<http://www.tqs.com.br/suporte-e-servicos/biblioteca-digital-tqs/89/199>>. Acesso em 04/09/19.

WASHA, G.W.; SAEMANN, J.C.; CRAMER, S.M.. Fifty-years properties of concrete made in 1937. In: **ACI Materials Journal**. v. 86, iss. 4, julho 1989. Resumo disponível em:

<<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=2139>>. Acesso em 09/06/19.

APÊNDICE A – Resultados individuais

Tabela A.1 – Resultados individuais de resistência à compressão.

(continua)

Concreto	Idade	C.P.	Compressão (MPa)	Resultados	
Seixo 0,70	7 dias	CP1	13,19	Média (MPa)	13,12
		CP2	12,78	Desvio Padrão (MPa)	0,31
		CP3	13,39	Coef. Variação (%)	2,37
	28 dias	CP1	15,76	Média (MPa)	16,24
		CP2	16,06	Desvio Padrão (MPa)	0,60
		CP3	16,91	Coef. Variação (%)	3,67
	91 dias	CP1	17,89	Média (MPa)	17,76
		CP2	17,42	Desvio Padrão (MPa)	0,30
		CP3	17,98	Coef. Variação (%)	1,69
	413 dias	CP1	19,04	Média (MPa)	20,29
		CP2	21,97	Desvio Padrão (MPa)	1,51
		CP3	19,86	Coef. Variação (%)	7,45
	18 anos	CP1	26,30	-	-
Seixo 0,50	7 dias	CP1	19,78	Média (MPa)	17,92
		CP2	17,75	Desvio Padrão (MPa)	1,79
		CP3	16,22	Coef. Variação (%)	9,97
	28 dias	CP1	29,29	Média (MPa)	30,30
		CP2	32,67	Desvio Padrão (MPa)	2,06
		CP3	28,93	Coef. Variação (%)	6,81
	91 dias	CP1	34,27	Média (MPa)	34,87
		CP2	34,63	Desvio Padrão (MPa)	0,74
		CP3	35,70	Coef. Variação (%)	2,13
	413 dias	CP1	35,88	Média (MPa)	35,61
		CP2	35,65	Desvio Padrão (MPa)	0,29
		CP3	35,31	Coef. Variação (%)	0,81
	18 anos	CP1	45,10	-	-
Seixo 0,35	7 dias	CP1	38,25	Média (MPa)	38,06
		CP2	38,12	Desvio Padrão (MPa)	0,23
		CP3	37,80	Coef. Variação (%)	0,61
	28 dias	CP1	40,83	Média (MPa)	39,88
		CP2	40,31	Desvio Padrão (MPa)	1,22
		CP3	38,51	Coef. Variação (%)	3,05
	91 dias	CP1	-	Média (MPa)	50,43
		CP2	50,82	Desvio Padrão (MPa)	0,56
		CP3	50,03	Coef. Variação (%)	1,11
	413 dias	CP1	59,84	Média (MPa)	58,95
		CP2	58,06	Desvio Padrão (MPa)	0,89
		CP3	58,95	Coef. Variação (%)	1,51
	18 anos	CP1	69,86	-	-

Tabela A.1 – Resultados individuais de resistência à compressão.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Compressão (MPa)	Resultados	
Basalto 0,70	7 dias	CP1	14,14	Média (MPa)	14,14
		CP2	13,82	Desvio Padrão (MPa)	0,32
		CP3	14,45	Coef. Variação (%)	2,23
	28 dias	CP1	18,29	Média (MPa)	17,93
		CP2	17,36	Desvio Padrão (MPa)	0,50
		CP3	18,15	Coef. Variação (%)	2,80
	91 dias	CP1	21,99	Média (MPa)	21,26
		CP2	21,01	Desvio Padrão (MPa)	0,64
		CP3	20,78	Coef. Variação (%)	3,02
	413 dias	CP1	23,65	Média (MPa)	24,03
		CP2	24,11	Desvio Padrão (MPa)	0,35
		CP3	24,33	Coef. Variação (%)	1,44
	18 anos	CP1	30,50	Média (MPa)	30,10
		CP2	29,90	Desvio Padrão (MPa)	0,35
		CP3	29,90	Coef. Variação (%)	1,15
Basalto 0,50	7 dias	CP1	24,27	Média (MPa)	23,87
		CP2	23,50	Desvio Padrão (MPa)	0,39
		CP3	23,83	Coef. Variação (%)	1,62
	28 dias	CP1	27,68	Média (MPa)	30,25
		CP2	31,92	Desvio Padrão (MPa)	2,26
		CP3	31,14	Coef. Variação (%)	7,46
	91 dias	CP1	36,73	Média (MPa)	36,70
		CP2	35,57	Desvio Padrão (MPa)	1,12
		CP3	37,80	Coef. Variação (%)	3,04
	413 dias	CP1	43,03	Média (MPa)	43,61
		CP2	44,18	Desvio Padrão (MPa)	0,58
		CP3	43,61	Coef. Variação (%)	1,32
	18 anos	CP1	48,30	Média (MPa)	45,83
		CP2	40,80	Desvio Padrão (MPa)	4,36
		CP3	48,40	Coef. Variação (%)	9,51
Basalto 0,35	7 dias	CP1	31,72	Média (MPa)	32,33
		CP2	30,93	Desvio Padrão (MPa)	1,78
		CP3	34,33	Coef. Variação (%)	5,50
	28 dias	CP1	42,18	Média (MPa)	40,82
		CP2	36,54	Desvio Padrão (MPa)	3,79
		CP3	43,74	Coef. Variação (%)	9,28
	91 dias	CP1	41,56	Média (MPa)	43,27
		CP2	41,38	Desvio Padrão (MPa)	3,12
		CP3	46,87	Coef. Variação (%)	7,21
	413 dias	CP1	66,72	Média (MPa)	66,72
		CP2	66,72	Desvio Padrão (MPa)	0,00
		CP3	66,72	Coef. Variação (%)	0,00

Tabela A.1 – Resultados individuais de resistência à compressão.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Compressão (MPa)	Resultados	
Basalto 0,35	18 anos	CP1	71,50	Média (MPa)	74,55
		CP2	77,60	Desvio Padrão (MPa)	4,31
		-	-	Coef. Variação (%)	5,79
Calcário 0,70	7 dias	CP1	15,06	Média (MPa)	15,33
		CP2	15,73	Desvio Padrão (MPa)	0,35
		CP3	15,21	Coef. Variação (%)	2,29
	28 dias	CP1	20,45	Média (MPa)	19,90
		CP2	19,60	Desvio Padrão (MPa)	0,47
		CP3	19,66	Coef. Variação (%)	2,38
	91 dias	CP1	21,51	Média (MPa)	21,34
		CP2	21,26	Desvio Padrão (MPa)	0,14
		CP3	21,26	Coef. Variação (%)	0,68
	413 dias	CP1	20,65	Média (MPa)	20,04
		CP2	19,30	Desvio Padrão (MPa)	0,68
		CP3	20,17	Coef. Variação (%)	3,41
	18 anos	CP1	23,30	Média (MPa)	22,37
		CP2	21,80	Desvio Padrão (MPa)	0,81
		CP3	22,00	Coef. Variação (%)	3,64
Calcário 0,50 Abatimento 20 mm	7 dias	CP1	29,57	Média (MPa)	28,82
		CP2	29,56	Desvio Padrão (MPa)	1,30
		CP3	27,32	Coef. Variação (%)	4,50
	28 dias	CP1	38,41	Média (MPa)	37,04
		CP2	36,58	Desvio Padrão (MPa)	1,21
		CP3	36,13	Coef. Variação (%)	3,26
	91 dias	CP1	43,53	Média (MPa)	42,10
		CP2	42,60	Desvio Padrão (MPa)	1,73
		CP3	40,18	Coef. Variação (%)	4,11
	413 dias	CP1	46,09	Média (MPa)	46,73
		CP2	47,36	Desvio Padrão (MPa)	0,64
		CP3	46,73	Coef. Variação (%)	1,36
	18 anos	CP1	42,20	Média (MPa)	44,90
		CP2	49,20	Desvio Padrão (MPa)	3,76
		CP3	43,30	Coef. Variação (%)	8,38
Calcário 0,50 Abatimento 110 mm	7 dias	CP1	27,22	Média (MPa)	26,87
		CP2	25,44	Desvio Padrão (MPa)	1,29
		CP3	27,94	Coef. Variação (%)	4,79
	28 dias	CP1	35,05	Média (MPa)	35,12
		CP2	37,15	Desvio Padrão (MPa)	2,00
		CP3	33,16	Coef. Variação (%)	5,68
	91 dias	CP1	38,53	Média (MPa)	35,22
		CP2	32,96	Desvio Padrão (MPa)	2,93
		CP3	34,16	Coef. Variação (%)	8,32

Tabela A.1 – Resultados individuais de resistência à compressão.

(conclusão)

Concreto	Idade	C.P.	Compressão (MPa)	Resultados	
Calcário 0,50 Abatimento 110 mm	413 dias	CP1	48,38	Média (MPa)	48,51
		CP2	48,64	Desvio Padrão (MPa)	0,13
		CP3	48,51	Coef. Variação (%)	0,27
	18 anos	CP1	49,60	Média (MPa)	48,20
		CP2	46,80	Desvio Padrão (MPa)	1,98
		-	-	Coef. Variação (%)	4,11
Calcário 0,50 Abatimento 200 mm	7 dias	CP1	23,44	Média (MPa)	24,73
		CP2	24,88	Desvio Padrão (MPa)	1,23
		CP3	25,88	Coef. Variação (%)	4,96
	28 dias	CP1	31,27	Média (MPa)	29,47
		CP2	30,06	Desvio Padrão (MPa)	2,15
		CP3	27,09	Coef. Variação (%)	7,30
	91 dias	CP1	34,76	Média (MPa)	32,35
		CP2	32,66	Desvio Padrão (MPa)	2,57
		CP3	29,64	Coef. Variação (%)	7,96
	413 dias	CP1	39,47	Média (MPa)	42,02
		CP2	44,56	Desvio Padrão (MPa)	2,55
		CP3	42,02	Coef. Variação (%)	6,06
	18 anos	CP1	44,70	Média (MPa)	42,07
		CP2	40,80	Desvio Padrão (MPa)	2,28
		CP3	40,70	Coef. Variação (%)	5,42
Calcário 0,35	7 dias	CP1	43,52	Média (MPa)	42,91
		CP2	43,12	Desvio Padrão (MPa)	0,73
		CP3	42,10	Coef. Variação (%)	1,71
	28 dias	CP1	50,96	Média (MPa)	51,61
		CP2	52,78	Desvio Padrão (MPa)	1,02
		CP3	51,08	Coef. Variação (%)	1,97
	91 dias	CP1	57,52	Média (MPa)	59,09
		CP2	55,65	Desvio Padrão (MPa)	4,44
		CP3	64,11	Coef. Variação (%)	7,52
	413 dias	CP1	67,23	Média (MPa)	65,45
		CP2	63,66	Desvio Padrão (MPa)	1,79
		CP3	65,45	Coef. Variação (%)	2,73
	18 anos	CP1	60,70	Média (MPa)	65,65
		CP2	70,60	Desvio Padrão (MPa)	7,00
		-	-	Coef. Variação (%)	10,66

Tabela A.2 – Resultados individuais de módulo de deformação tangente inicial.

(continua)

Concreto	Idade	C.P.	Módulo de Deformação Tangente Inicial (Gpa)	Resultados	
Seixo 0,70	7 dias	CP1	18,62	Média (MPa)	17,99
		CP2	18,15	Desvio Padrão (MPa)	0,72
		CP3	17,21	Coef. Variação (%)	3,99
	28 dias	CP1	21,20	Média (MPa)	20,30
		CP2	20,61	Desvio Padrão (MPa)	1,09
		CP3	19,08	Coef. Variação (%)	5,39
	91 dias	CP1	21,20	Média (MPa)	20,83
		CP2	19,08	Desvio Padrão (MPa)	1,59
		CP3	22,20	Coef. Variação (%)	7,65
	413 dias	CP1	23,67	Média (MPa)	23,67
		CP2	23,05	Desvio Padrão (MPa)	0,62
		CP3	24,28	Coef. Variação (%)	2,60
	18 anos	CP1	20,30	-	-
Seixo 0,50	7 dias	CP1	21,69	Média (MPa)	20,95
		CP2	20,95	Desvio Padrão (MPa)	0,74
		CP3	20,21	Coef. Variação (%)	3,53
	28 dias	CP1	23,32	Média (MPa)	24,24
		CP2	24,29	Desvio Padrão (MPa)	0,89
		CP3	25,10	Coef. Variação (%)	3,68
	91 dias	CP1	25,67	Média (MPa)	24,72
		CP2	23,10	Desvio Padrão (MPa)	1,41
		CP3	25,38	Coef. Variação (%)	5,69
	413 dias	CP1	23,87	Média (MPa)	26,36
		CP2	26,38	Desvio Padrão (MPa)	2,49
		CP3	28,84	Coef. Variação (%)	9,43
	18 anos	CP1	28,30	-	-
Seixo 0,35	7 dias	CP1	24,41	Média (MPa)	24,38
		CP2	23,26	Desvio Padrão (MPa)	1,11
		CP3	25,48	Coef. Variação (%)	4,55
	28 dias	CP1	29,69	Média (MPa)	27,41
		CP2	24,57	Desvio Padrão (MPa)	2,60
		CP3	27,96	Coef. Variação (%)	9,50
	91 dias	CP1	28,29	Média (MPa)	27,87
		CP2	27,34	Desvio Padrão (MPa)	0,49
		CP3	27,99	Coef. Variação (%)	1,74
	413 dias	CP1	30,34	Média (MPa)	28,74
		CP2	27,14	Desvio Padrão (MPa)	1,60
		CP3	28,74	Coef. Variação (%)	5,57
Seixo 0,35	18 anos	CP1	31,60	-	-

Tabela A.2 – Resultados individuais de módulo de deformação tangente inicial.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Módulo de Deformação Tangente Inicial (Gpa)	Resultados	
Basalto 0,70	7 dias	CP1	26,94	Média (MPa)	26,79
		CP2	27,18	Desvio Padrão (MPa)	0,48
		CP3	26,25	Coef. Variação (%)	1,80
	28 dias	CP1	28,23	Média (MPa)	29,37
		CP2	30,51	Desvio Padrão (MPa)	1,14
		CP3	29,37	Coef. Variação (%)	3,88
	91 dias	CP1	32,33	Média (MPa)	33,25
		CP2	34,13	Desvio Padrão (MPa)	0,90
		CP3	33,29	Coef. Variação (%)	2,71
	413 dias	CP1	32,24	Média (MPa)	33,56
		CP2	34,88	Desvio Padrão (MPa)	1,32
		CP3	33,56	Coef. Variação (%)	3,93
	18 anos	CP1	26,60	Média (MPa)	26,37
		CP2	26,40	Desvio Padrão (MPa)	0,25
		CP3	26,10	Coef. Variação (%)	0,95
Basalto 0,50	7 dias	CP1	32,17	Média (MPa)	32,36
		CP2	31,94	Desvio Padrão (MPa)	0,54
		CP3	32,96	Coef. Variação (%)	1,65
	28 dias	CP1	36,09	Média (MPa)	34,64
		CP2	32,30	Desvio Padrão (MPa)	2,05
		CP3	35,53	Coef. Variação (%)	5,91
	91 dias	CP1	37,26	Média (MPa)	39,03
		CP2	40,43	Desvio Padrão (MPa)	1,62
		CP3	39,41	Coef. Variação (%)	4,15
	413 dias	CP1	40,11	Média (MPa)	40,11
		CP2	40,22	Desvio Padrão (MPa)	0,11
		CP3	40,00	Coef. Variação (%)	0,27
	18 anos	CP1	31,30	Média (MPa)	31,80
		CP2	31,80	Desvio Padrão (MPa)	0,50
		CP3	32,30	Coef. Variação (%)	1,57
Basalto 0,35	7 dias	CP1	35,75	Média (MPa)	35,88
		CP2	34,99	Desvio Padrão (MPa)	0,96
		CP3	36,90	Coef. Variação (%)	2,68
	28 dias	CP1	43,86	Média (MPa)	41,22
		CP2	40,82	Desvio Padrão (MPa)	2,46
		CP3	38,99	Coef. Variação (%)	5,97
	91 dias	CP1	41,04	Média (MPa)	40,81
		CP2	40,75	Desvio Padrão (MPa)	0,20
		CP3	40,65	Coef. Variação (%)	0,50
	413 dias	CP1	42,75	Média (MPa)	44,73
		CP2	46,71	Desvio Padrão (MPa)	1,98
		CP3	44,73	Coef. Variação (%)	4,43

Tabela A.2 – Resultados individuais de módulo de deformação tangente inicial.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Módulo de Deformação Tangente Inicial (Gpa)	Resultados	
Basalto 0,35	18 anos	CP1	41,30	Média (MPa)	40,10
		CP2	38,90	Desvio Padrão (MPa)	1,70
		-	-	Coef. Variação (%)	4,23
Calcário 0,70	7 dias	CP1	20,45	Média (MPa)	22,18
		CP2	22,46	Desvio Padrão (MPa)	1,60
		CP3	23,62	Coef. Variação (%)	7,23
	28 dias	CP1	26,80	Média (MPa)	25,44
		CP2	25,44	Desvio Padrão (MPa)	1,36
		CP3	24,08	Coef. Variação (%)	5,35
	91 dias	CP1	24,83	Média (MPa)	26,62
		CP2	27,82	Desvio Padrão (MPa)	1,58
		CP3	27,20	Coef. Variação (%)	5,93
	413 dias	CP1	29,18	Média (MPa)	28,12
		CP2	27,81	Desvio Padrão (MPa)	0,94
		CP3	27,38	Coef. Variação (%)	3,34
	18 anos	CP1	23,60	Média (MPa)	19,77
		CP2	18,10	Desvio Padrão (MPa)	3,33
		CP3	17,60	Coef. Variação (%)	16,84
Calcário 0,50 Abatimento 20 mm	7 dias	CP1	28,28	Média (MPa)	27,82
		CP2	28,04	Desvio Padrão (MPa)	0,60
		CP3	27,14	Coef. Variação (%)	2,16
	28 dias	CP1	28,25	Média (MPa)	29,31
		CP2	31,30	Desvio Padrão (MPa)	1,72
		CP3	28,39	Coef. Variação (%)	5,87
	91 dias	CP1	31,06	Média (MPa)	31,07
		CP2	31,92	Desvio Padrão (MPa)	0,85
		CP3	30,22	Coef. Variação (%)	2,74
	413 dias	CP1	34,76	Média (MPa)	33,77
		CP2	33,21	Desvio Padrão (MPa)	0,86
		CP3	33,34	Coef. Variação (%)	2,55
	18 anos	CP1	31,10	Média (MPa)	31,30
		CP2	31,30	Desvio Padrão (MPa)	0,20
		CP3	31,50	Coef. Variação (%)	0,64
Calcário 0,50 Abatimento 110 mm	7 dias	CP1	27,47	Média (MPa)	26,85
		CP2	25,80	Desvio Padrão (MPa)	0,91
		CP3	27,27	Coef. Variação (%)	3,40
	28 dias	CP1	27,61	Média (MPa)	28,21
		CP2	28,34	Desvio Padrão (MPa)	0,55
		CP3	28,69	Coef. Variação (%)	1,95
	91 dias	CP1	29,03	Média (MPa)	29,39
		CP2	29,40	Desvio Padrão (MPa)	0,36
		CP3	29,74	Coef. Variação (%)	1,21

Tabela A.2 – Resultados individuais de módulo de deformação tangente inicial.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Módulo de Deformação Tangente Inicial (Gpa)	Resultados	
Calcário 0,50 Abatimento 110 mm	413 dias	CP1	32,11	Média (MPa)	33,68
		CP2	34,86	Desvio Padrão (MPa)	1,42
		CP3	34,07	Coef. Variação (%)	4,20
	18 anos	CP1	30,90	Média (MPa)	29,77
		CP2	28,40	Desvio Padrão (MPa)	1,27
		CP3	30,00	Coef. Variação (%)	4,25
Calcário 0,50 Abatimento 200 mm	7 dias	CP1	22,78	Média (MPa)	24,64
		CP2	27,57	Desvio Padrão (MPa)	2,57
		CP3	23,57	Coef. Variação (%)	10,42
	28 dias	CP1	28,84	Média (MPa)	28,11
		CP2	26,39	Desvio Padrão (MPa)	1,49
		CP3	29,09	Coef. Variação (%)	5,31
	91 dias	CP1	28,66	Média (MPa)	29,65
		CP2	30,58	Desvio Padrão (MPa)	0,96
		CP3	29,71	Coef. Variação (%)	3,24
	413 dias	CP1	30,62	Média (MPa)	30,19
		CP2	30,29	Desvio Padrão (MPa)	0,49
		CP3	29,65	Coef. Variação (%)	1,63
	18 anos	CP1	28,10	Média (MPa)	29,67
		CP2	29,90	Desvio Padrão (MPa)	1,46
		CP3	31,00	Coef. Variação (%)	4,93
Calcário 0,35	7 dias	CP1	29,74	Média (MPa)	29,18
		CP2	29,45	Desvio Padrão (MPa)	0,74
		CP3	28,34	Coef. Variação (%)	2,53
	28 dias	CP1	32,31	Média (MPa)	31,87
		CP2	30,47	Desvio Padrão (MPa)	1,24
		CP3	32,84	Coef. Variação (%)	3,90
	91 dias	CP1	31,38	Média (MPa)	32,64
		CP2	33,48	Desvio Padrão (MPa)	1,11
		CP3	33,05	Coef. Variação (%)	3,40
	413 dias	CP1	33,11	Média (MPa)	34,78
		CP2	34,59	Desvio Padrão (MPa)	1,77
		CP3	36,64	Coef. Variação (%)	5,10
	18 anos	CP1	36,50	Média (MPa)	36,17
		CP2	35,40	Desvio Padrão (MPa)	0,67
		CP3	36,60	Coef. Variação (%)	1,84

Tabela A.3 – Resultados individuais de resist. à tração por compressão diametral.

(continua)

Concreto	Idade	C.P.	Tração (Gpa)	Resultados	
Seixo 0,70	7 dias	CP1	1,11	Média (MPa)	1,15
		CP2	1,16	Desvio Padrão (MPa)	0,04
		CP3	1,19	Coef. Variação (%)	3,50
	28 dias	CP1	2,11	Média (MPa)	1,92
		CP2	1,82	Desvio Padrão (MPa)	0,17
		CP3	1,82	Coef. Variação (%)	8,74
	91 dias	CP1	1,92	Média (MPa)	1,94
		CP2	2,02	Desvio Padrão (MPa)	0,08
		CP3	1,87	Coef. Variação (%)	3,94
	413 dias	CP1	1,96	Média (MPa)	2,11
		CP2	2,10	Desvio Padrão (MPa)	0,15
		CP3	2,26	Coef. Variação (%)	7,13
	18 anos	CP1	-	-	-
Seixo 0,50	7 dias	CP1	2,63	Média (MPa)	2,66
		CP2	2,68	Desvio Padrão (MPa)	0,04
		CP3	-	Coef. Variação (%)	1,33
	28 dias	CP1	2,97	Média (MPa)	2,86
		CP2	2,92	Desvio Padrão (MPa)	0,14
		CP3	2,70	Coef. Variação (%)	5,02
	91 dias	CP1	2,62	Média (MPa)	2,64
		CP2	2,63	Desvio Padrão (MPa)	0,02
		CP3	2,66	Coef. Variação (%)	0,79
	413 dias	CP1	3,73	Média (MPa)	3,68
		CP2	4,16	Desvio Padrão (MPa)	0,51
		CP3	3,14	Coef. Variação (%)	13,93
	18 anos	CP1	3,61	-	-
Seixo 0,35	7 dias	CP1	3,12	Média (MPa)	3,07
		CP2	3,11	Desvio Padrão (MPa)	0,08
		CP3	2,98	Coef. Variação (%)	2,54
	28 dias	CP1	3,61	Média (MPa)	3,40
		CP2	3,36	Desvio Padrão (MPa)	0,20
		CP3	3,22	Coef. Variação (%)	5,82
	91 dias	CP1	3,47	Média (MPa)	3,56
		CP2	3,69	Desvio Padrão (MPa)	0,11
		CP3	3,53	Coef. Variação (%)	3,19
	413 dias	CP1	3,93	Média (MPa)	4,05
		CP2	4,16	Desvio Padrão (MPa)	0,12
		CP3	4,07	Coef. Variação (%)	2,86
	18 anos	CP1	-	-	-
Basalto 0,70	7 dias	CP1	2,01	Média (MPa)	1,93
		CP2	1,90	Desvio Padrão (MPa)	0,07
		CP3	1,88	Coef. Variação (%)	3,63
	28 dias	CP1	2,36	Média (MPa)	2,29
		CP2	2,30	Desvio Padrão (MPa)	0,07
		CP3	2,22	Coef. Variação (%)	3,06

Tabela A.3 – Resultados individuais de resist. à tração por compressão diametral.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Tração (Gpa)	Resultados	
Basalto 0,70	91 dias	CP1	2,50	Média (MPa)	2,60
		CP2	2,76	Desvio Padrão (MPa)	0,14
		CP3	2,55	Coef. Variação (%)	5,30
	413 dias	CP1	3,23	Média (MPa)	3,19
		CP2	3,23	Desvio Padrão (MPa)	0,07
		CP3	3,11	Coef. Variação (%)	2,17
	18 anos	CP1	3,08	Média (MPa)	3,14
		CP2	3,20	Desvio Padrão (MPa)	0,08
		-	-	Coef. Variação (%)	2,70
Basalto 0,50	7 dias	CP1	2,83	Média (MPa)	2,72
		CP2	2,66	Desvio Padrão (MPa)	0,10
		CP3	2,67	Coef. Variação (%)	3,51
	28 dias	CP1	2,86	Média (MPa)	3,13
		CP2	3,05	Desvio Padrão (MPa)	0,32
		CP3	3,48	Coef. Variação (%)	10,15
	91 dias	CP1	3,59	Média (MPa)	3,56
		CP2	3,46	Desvio Padrão (MPa)	0,09
		CP3	3,63	Coef. Variação (%)	2,50
	413 dias	CP1	5,04	Média (MPa)	4,69
		CP2	4,70	Desvio Padrão (MPa)	0,36
		CP3	4,33	Coef. Variação (%)	7,57
	18 anos	CP1	3,87	Média (MPa)	4,04
		CP2	4,14	Desvio Padrão (MPa)	0,15
		CP3	4,11	Coef. Variação (%)	3,66
Basalto 0,35	7 dias	CP1	-	Média (MPa)	3,35
		CP2	3,16	Desvio Padrão (MPa)	0,26
		CP3	3,53	Coef. Variação (%)	7,82
	28 dias	CP1	3,18	Média (MPa)	3,40
		CP2	3,63	Desvio Padrão (MPa)	0,23
		CP3	3,38	Coef. Variação (%)	6,64
	91 dias	CP1	3,97	Média (MPa)	4,32
		CP2	4,65	Desvio Padrão (MPa)	0,34
		CP3	4,35	Coef. Variação (%)	7,88
	413 dias	CP1	5,83	Média (MPa)	5,50
		CP2	5,57	Desvio Padrão (MPa)	0,38
		CP3	5,09	Coef. Variação (%)	6,83
	18 anos	CP1	4,78	Média (MPa)	5,23
		CP2	5,67	Desvio Padrão (MPa)	0,63
		-	-	Coef. Variação (%)	12,04
Calcário 0,70	7 dias	CP1	2,05	Média (MPa)	1,92
		CP2	1,64	Desvio Padrão (MPa)	0,24
		CP3	2,07	Coef. Variação (%)	12,64
	28 dias	CP1	2,37	Média (MPa)	2,40
		CP2	2,45	Desvio Padrão (MPa)	0,04
		CP3	2,39	Coef. Variação (%)	1,73

Tabela A.3 – Resultados individuais de resist. à tração por compressão diametral.

(continuação)

Concreto	Idade	C.P.	Tração (Gpa)	Resultados	
Calcário 0,70	91 dias	CP1	2,72	Média (MPa)	2,47
		CP2	2,27	Desvio Padrão (MPa)	0,23
		CP3	2,43	Coef. Variação (%)	9,22
	413 dias	CP1	2,47	Média (MPa)	2,48
		CP2	2,72	Desvio Padrão (MPa)	0,24
		CP3	2,25	Coef. Variação (%)	9,48
	18 anos	CP1	2,31	Média (MPa)	2,29
		CP2	2,35	Desvio Padrão (MPa)	0,08
		CP3	2,20	Coef. Variação (%)	3,52
Calcário 0,50 Abatimento 20 mm	7 dias	CP1	2,93	Média (MPa)	3,08
		CP2	3,20	Desvio Padrão (MPa)	0,14
		CP3	3,12	Coef. Variação (%)	4,50
	28 dias	CP1	3,57	Média (MPa)	3,53
		CP2	3,43	Desvio Padrão (MPa)	0,08
		CP3	3,58	Coef. Variação (%)	2,38
	91 dias	CP1	3,36	Média (MPa)	3,59
		CP2	3,76	Desvio Padrão (MPa)	0,21
		CP3	3,65	Coef. Variação (%)	5,76
	413 dias	CP1	4,13	Média (MPa)	4,38
		CP2	4,44	Desvio Padrão (MPa)	0,23
		CP3	4,58	Coef. Variação (%)	5,25
	18 anos	CP1	3,66	Média (MPa)	3,77
		CP2	3,90	Desvio Padrão (MPa)	0,12
		CP3	3,76	Coef. Variação (%)	3,19
Calcário 0,50 Abatimento 110 mm	7 dias	CP1	2,62	Média (MPa)	2,63
		CP2	2,61	Desvio Padrão (MPa)	0,03
		CP3	2,67	Coef. Variação (%)	1,22
	28 dias	CP1	3,69	Média (MPa)	3,52
		CP2	3,17	Desvio Padrão (MPa)	0,30
		CP3	3,69	Coef. Variação (%)	8,54
	91 dias	CP1	2,99	Média (MPa)	3,05
		CP2	3,07	Desvio Padrão (MPa)	0,05
		CP3	3,09	Coef. Variação (%)	1,73
	413 dias	CP1	4,75	Média (MPa)	4,30
		CP2	4,27	Desvio Padrão (MPa)	0,44
		CP3	3,88	Coef. Variação (%)	10,13
	18 anos	CP1	3,98	Média (MPa)	3,80
		CP2	3,54	Desvio Padrão (MPa)	0,23
			3,89	Coef. Variação (%)	6,11
Calcário 0,50 Abatimento 200 mm	7 dias	CP1	2,69	Média (MPa)	2,78
		CP2	2,77	Desvio Padrão (MPa)	0,09
		CP3	2,87	Coef. Variação (%)	3,25
	28 dias	CP1	2,93	Média (MPa)	3,13
		CP2	3,34	Desvio Padrão (MPa)	0,21
		CP3	3,12	Coef. Variação (%)	6,56

Tabela A.3 – Resultados individuais de resist. à tração por compressão diametral.

(conclusão)

Concreto	Idade	C.P.	Tração (Gpa)	Resultados	
Calcário 0,50 Abatimento 200 mm	91 dias	CP1	3,08	Média (MPa)	3,16
		CP2	2,90	Desvio Padrão (MPa)	0,31
		CP3	3,51	Coef. Variação (%)	9,91
	413 dias	CP1	4,27	Média (MPa)	4,05
		CP2	4,16	Desvio Padrão (MPa)	0,29
		CP3	3,73	Coef. Variação (%)	7,04
	18 anos	CP1	3,79	Média (MPa)	3,94
		CP2	3,99	Desvio Padrão (MPa)	0,13
		CP3	4,04	Coef. Variação (%)	3,36
Calcário 0,35	7 dias	CP1	3,74	Média (MPa)	3,87
		CP2	3,98	Desvio Padrão (MPa)	0,12
		CP3	3,90	Coef. Variação (%)	3,15
	28 dias	CP1	4,67	Média (MPa)	4,47
		CP2	4,70	Desvio Padrão (MPa)	0,37
		CP3	4,05	Coef. Variação (%)	8,20
	91 dias	CP1	4,23	Média (MPa)	4,36
		CP2	4,84	Desvio Padrão (MPa)	0,43
		CP3	4,01	Coef. Variação (%)	9,86
	413 dias	CP1	5,43	Média (MPa)	5,37
		CP2	5,72	Desvio Padrão (MPa)	0,39
		CP3	4,95	Coef. Variação (%)	7,25
	18 anos	CP1	5,70	Média (MPa)	5,54
		CP2	5,45	Desvio Padrão (MPa)	0,14
		CP3	5,48	Coef. Variação (%)	2,46