

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

SAMIRA RODRIGUES DA SILVA

ESTUDO TEÓRICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Jataí
2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

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: Samira Rodrigues da Silva

Matrícula: 20141020260167

Título do Trabalho: Estudo teórico do módulo de elasticidade do concreto

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 incluídos 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.



Documento assinado digitalmente
SAMIRA RODRIGUES DA SILVA OLIVEIRA
Data: 27/11/2024 16:10:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jataí, 27/11/2024

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

SAMIRA RODRIGUES DA SILVA

ESTUDO TEÓRICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Jerônimo Otoni de Carvalho Neto

**Jataí
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Silva, Samira Rodrigues da.

Estudo teórico do módulo de elasticidade do concreto [manuscrito]/
Samira Rodrigues do Silva. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Civil, 2024.

53 f.; il.

Orientador: Prof. Me. Jeronimo Otoni de Carvalho Neto.

Bibliografias.

1. Módulo de elasticidade. 2. Concreto. 3. Ensaios. I. Carvalho Neto,
Jeronimo Otoni de. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.
Bibliotecária – Rosy Cristina Oliveira Barbosa – CRB 1/2380 – Campus Jataí. Cód. F054/2024-2.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

SAMIRA RODRIGUES DA SILVA

ESTUDO TEÓRICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 16 de julho de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Jeronimo Otoni de Carvalho Neto
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Esp. Ronan de Oliveira Lopes Junior
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Eng^a. Civil Jacquelyne Martins Pimentel
Membro Externo
Prefeitura Municipal de Jataí

Jataí – GO
2022

Documento assinado eletronicamente por:

- Ronan de Oliveira Lopes Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/09/2022 12:38:28.
- Jacquelyne Martins Pimentel, Jacquelyne Martins Pimentel - 214205 - Engenheiro civil - Prefeitura Municipal de Jataí (1), em 26/07/2022 18:44:55.
- Jeronimo Otoni de Carvalho Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/07/2022 11:02:09.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/07/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 303536

Código de Autenticação: bfdb9fdf7b



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0837 (ramal: 837)

DEDICATÓRIA

À minha família.

Em especial, à minha mãe.

AGRADECIMENTO

O trabalho de conclusão de um curso representa o término de um ciclo. Durante os anos da graduação muitas pessoas passam pelas nossas vidas, algumas ganhando uma importância maior em relação às outras, porque influenciaram diretamente na minha trajetória e sou profundamente grata por isso. Começo agradecendo aos meus familiares, especialmente minha mãe e avó que sempre colocaram a educação como prioridade, me oportunizando condições para seguir estudando. Por terem me apoiado nos momentos mais difíceis e me incentivarem a continuar lutando em busca dos meus sonhos. Ao meu esposo e filhos que sempre estiveram ao meu lado, me auxiliando, me apoiando e também servindo de alicerce na minha trajetória. Ao professor e orientador Jeronimo Otoni de Carvalho Neto pela dedicação, competência e conhecimentos compartilhados durante a realização deste trabalho. Aos amigos, pelo companheirismo, confiança e amizade. Dentre tantos, Jordana, Raiure, Paula Fernanda e Laura Vilela. A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

Não sei de que modo o mundo me vê. Mas a mim mesmo, pareço ter sido apenas um menino brincando na praia, entretendo-me com encontrar, de quando em quando, um seixo mais liso ou uma concha mais bela que o ordinário, enquanto todo o vasto oceano da verdade jazia inexplorado diante de mim.

Isaac Newton

RESUMO

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é a razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação específica imediata nele verificada. Dentro de certos limites, existe uma relação de proporcionalidade entre tensão e deformação. No concreto, esta razão não se aplica, pois depende e varia de acordo com o nível de carga aplicada. O objetivo central do trabalho é abordar e analisar os fatores, intrínsecos ao material concreto e extrínsecos (parâmetros de ensaio), que possam interferir na determinação do módulo de elasticidade. Além disso, verificar se os valores obtidos experimentalmente do módulo de elasticidade do concreto para fins estruturais estão próximos daqueles encontrados através das expressões sugeridas na NBR 6118:2014, para os casos em que não forem realizados os ensaios, ou se é recomendável a realização dos ensaios conforme a NBR 8522.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade. Concreto. Ensaios.

ABSTRACT

The modulus of elasticity or Young's modulus is the relationship between a stress applied to a body and the immediate specific strain verified in it. Within certain limits, there is a proportionality relationship between stress and strain. In concrete, this proportionality does not apply, as it depends and varies according to the applied load level. The main objective of the work is to approach and analyze the factors, intrinsic to the concrete material and extrinsic (test parameters), that may interfere in the determination of the modulus of elasticity. In addition, verify if the values obtained experimentally of the modulus of elasticity of the concrete for structural purposes are close to those found through the expressions suggested in NBR 6118:2014, for cases in which the tests are not carried out, or if it is recommended to carry out the tests according to NBR 8522.

Keywords: Modulus of elasticity. Concrete. Rehearsal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.....	16
Figura 2 - Comportamento típico da curva tensão-deformação para o concreto e seus principais componentes.....	21
Figura 3- Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial.....	25
Figura 4 - Diferentes tipos de módulo de elasticidade.....	27
Figura 5– Formato dos agregados graúdos.....	29
Figura 6: Representação do módulo de deformação secante (E_{cs}).....	36
Figura 7: Representação do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}).....	36
Figura 8: Comparação entre o módulo de elasticidade calculados e experimentais.....	39
Figura 9– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo A.....	40
Figura 10– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo B.....	41
Figura 11– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo C.....	41
Figura 12– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo D.....	41
Figura 13– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo A.....	42
Figura 14– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo B.....	43
Figura 15– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo C.....	43

Figura 16– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo D.....	43
Figura 17– Módulo de elasticidade aos 28 dias (UDIA).....	44
Figura 18- Módulo de elasticidade aos 28 dias (UBERA).....	45
Figura 19– Comparação entre os valores encontrados para Basalto-UBERA e valores calculados pela NBR 6118:2014.....	46
Figura 20– Comparação entre os valores encontrados para Basalto-UDIA e valores calculados pela NBR 6118:2014.....	46
Figura 21- Módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado basáltico.....	47
Figura 22– Comparação entre os valores encontrados para Basalto e valores calculados pela NBR 6118:2014.....	47
Figura 23- Comparação entre os valores calculados pela equação Dal Molin e NBR 6118:2014.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores do módulo de elasticidade.....	20
Tabela 2 – Resistência e Módulo de elasticidade de algumas rochas.....	28
Tabela 3: Comparação do módulo de elasticidade calculadas pela NBR 6118:2014 e NBR8522:2017.....	38
Tabela 4 - Expressões da NBR 6118 para a estimativa do módulo de elasticidade.....	39
Tabela 5- Valores de Eci de todos os concretos.....	40
Tabela 6– Comparação entre os valores de Eci encontrados e calculados pela equação da NBR 6118:2014.....	42
Tabela 7 – Valores de modulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado basáltico.....	44
Tabela 8– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014.....	45
Tabela 9- Valores de modulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado basáltico.....	46
Tabela 10- Valores de modulo de elasticidade dos concretos para diferentes valores de resistência a compressão.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM- American Society for Testing and Materials

ACI - American Concrete Institute

EUROCODE 2 – Norma 2 da União Europeia – Projeto de Estruturas de Concreto

CEB-FIP Model Code - Comité Européen du Béton. The International Federation for Structural Concrete

GPa= Gigapascal

ISO= International Organization for Standardization

MPa= Megapascal

NBR= Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c = Relação água/cimento

E = Módulo de elasticidade

E_c = Módulo de elasticidade estático

E_{ci} = Módulo de elasticidade tangente inicial

E_{cs} = Módulo de elasticidade secante

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico

E_{cordal} = Módulo de elasticidade cordal

E_{cd} = Valor de projeto do módulo secante de elasticidade

F_{cm} = Resistencia média do concreto

F_{ck} = Resistencia característica do concreto

F_c = Resistencia à compressão do concreto

αE = Fatores de correção

ε = Deformação específica, definida como a relação entre a variação de comprimento em um dado instante e o comprimento inicial do corpo de prova.

σ = Tensão, definida como o quociente de carga instantânea aplicada na direção perpendicular e a área da seção reta original antes da aplicação da carga.

ω_c = Massa específica aparente do concreto

Sumário

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	13
LISTA DE SÍMBOLOS.....	14
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	18
1.2.1 Objetivos Específicos.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	24
2.2 comportamento tensão-deformação.....	25
2.3 TIPOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.....	26
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	28
2.4.1 Agregado.....	28
2.4.2 Matriz da pasta de cimento.....	30
2.4.3 Zona de transição da interface da pasta e do agregado.....	30
2.4.4 Parâmetros de ensaio.....	30
2.5 Como estimar o Módulo de Elasticidade.....	31
2.5.1 ABNT NBR 6118 (2014).....	31
2.5.2 CEB-FIP Model Code (2013).....	32
2.5.3 Eurocode2 (2004).....	33
2.5.4 ACI 318 (2011).....	34
2.6 Como medir o modulo de elasticidade.....	35
2.6.1 Métodos estáticos.....	35
2.6.2 Métodos dinâmicos.....	37
CAPITULO 3 METODOLOGIA.....	38
CAPITULO 4 RESULTADOS.....	39
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de se construir estruturas cada vez mais altas e esbeltas, fez com que as técnicas de construção e os materiais usados nas obras se desenvolvessem. Isso fez com que houvesse uma necessidade crescente de adequação das normas à nova realidade.

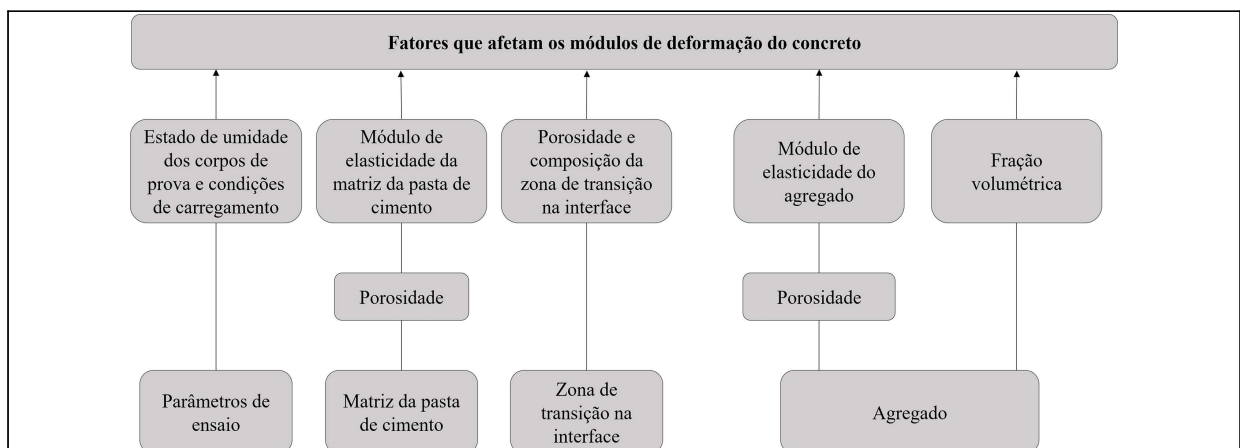
A diversidade dos materiais e a sua influência nas propriedades do concreto, implicam em uma mudança na concepção e execução das estruturas de concreto. Diante disso, vale salientar a importância de uma análise além da resistência à compressão do concreto.

Com isso, o módulo de elasticidade passa a ser importante no processo construtivo de edificações, pela aplicação das cargas em todos os momentos da construção: nas fases de retiradas das formas e escoramentos e cargas acidentais, por exemplo.

Por estar associado às deformações estruturais, cujo excesso é determinante para causar fissuras em alvenarias, deslocamentos de pisos em lajes e outras patologias, o módulo de elasticidade também é um requisito indispensável para se mensurar a vida útil de uma estrutura de concreto (PEDROSO, 2007).

Contudo, a determinação do módulo de elasticidade do concreto não é simples. Primeiro, por ser um material compósito, não se comporta como esperado pela lei de Hooke, ou seja, não apresenta proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação específica resultante. Além disso, esta importante propriedade do concreto é afetada por diversos fatores, de acordo com Mehta & Monteiro (2014), como se observa na Figura 1.

Figura 1: Vários parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.



1.1 JUSTIFICATIVA

O aumento da durabilidade e resistência do concreto somado às mudanças nos padrões construtivos e evolução dos métodos de cálculo utilizados pelos projetistas, fez possível a construção de edifícios mais altos, seções transversais mais esbeltas e vão livres maiores. Com isso, houve a redução da inércia dos elementos estruturais e o aumento de seu deslocamento, segundo Melo Neto e Helene (2002).

Por apresentar um comportamento não linear quando submetido à tensão de compressão ou de tração, devido a sua natureza viscoelástica, as deformações no concreto não são diretamente proporcionais às tensões aplicadas e estas deformações nem sempre desaparecem por completo após a solicitação. A especificação errônea do módulo de elasticidade para o dimensionamento estrutural pode ter graves consequências como, por exemplo, eventuais deformações excessivas.

No cálculo estrutural o valor do módulo de elasticidade do concreto é utilizado para estimar (PEDROSO, 2007):

- a rigidez de uma estrutura ou de um elemento estrutural pelo produto EI (onde I é o momento de inércia da seção considerada);
- as perdas de protensão, em elementos de concreto protendido;
- as deformações diferidas no tempo;
- outras condições em função do tipo de estrutura.

Convém lembrar que diversas outras variáveis concorrem para a estimativa dessas grandezas, além do módulo de elasticidade do concreto.

Mesmo tendo tamanha importância, o módulo de deformação tangente inicial, obtido aos 28 dias, raramente é determinado de acordo com a NBR 8522: 2017. Quando não é determinado, o módulo de elasticidade é simplesmente estimado, utilizando-se expressões estabelecidas na

NBR 6118: 2014, que levam em consideração o valor da resistência à compressão do concreto e o tipo de rocha empregado na sua produção.

Entretanto, além da resistência à compressão e do tipo de rocha empregado na produção do concreto, vários outros fatores podem influenciar seu valor, tais como, relação água/cimento, porosidade do concreto, a composição da interface entre a pasta de cimento e os agregados graúdos (zona de transição), entre outros, como mostrado anteriormente. Os procedimentos de ensaio também podem gerar discrepância nos resultados obtidos. Tipos de extensômetros e dimensão dos corpos de prova são exemplos de variáveis que afetam o valor do módulo de elasticidade (ARAÚJO, GUIMARÃES e GEYER, 2012).

Diversos métodos de ensaio podem ser utilizados para o controle do valor do módulo especificado pelo projetista. Esse controle pode ser de forma estática, normalizado pela ABNT NBR 8522:2017, ou de forma dinâmica, de acordo com normas e métodos internacionais. Há alguns anos, pesquisadores procuram estabelecer a relação entre o módulo dinâmico e o estático. Segundo Malhotra (1986) essa relação não é facilmente determinada pela análise do comportamento físico, pois a heterogeneidade do concreto influencia nos dois módulos de forma diferente.

Portanto, especificar o módulo de elasticidade, além da resistência a compressão do concreto, juntamente com o conhecimento das deformações reais da estrutura do concreto e de outros padrões que expressam as condições dos estados limites de serviços, passou a ter uma importância muito maior para os cálculos das estruturas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é comparar os valores encontrados na literatura para o módulo de elasticidade obtidos experimentalmente com aqueles fornecidos pelas expressões apresentadas na NBR 6118: 2014.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os fatores intrínsecos ao concreto que afetam os valores obtidos no módulo de elasticidade.

- Apresentar os parâmetros de ensaio que podem afetar o valor encontrado para o módulo de elasticidade do concreto.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Melo Neto e Helene (2002) descrevem como as evoluções nos padrões construtivos e a evolução dos métodos de cálculo utilizados pelos projetistas, causando mudanças significativas nos padrões arquitetônicos, aumentaria as deformações do concreto, o que levou projetistas a especificar além da resistência a compressão do concreto desejada também o seu módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade tem uma estreita relação com a durabilidade da estrutura, pois seu valor está relacionado às deformações estruturais que precisam se manter dentro do limite, pois em excesso podem causar fissuras em alvenarias e no próprio concreto, além de outras patologias, como visto acima. Por isso, determinar o módulo de elasticidade dos materiais em uma estrutura é imprescindível para obter a vida útil da mesma (PEDROSO, 2007).

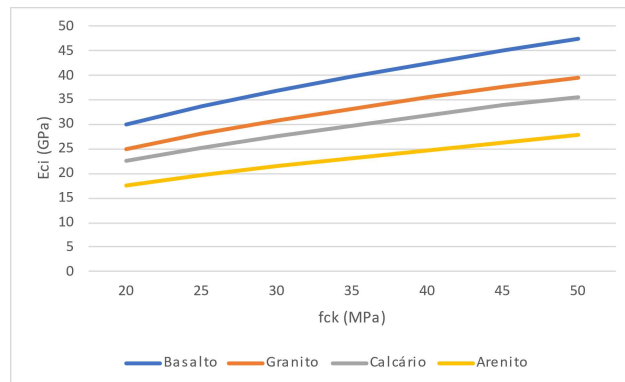
Como já foi dito, ele pode ser determinado de acordo com a NBR 8522: 2017 ou simplesmente estimado pelas fórmulas previstas na NBR 6118: 20014. Além de variar com a resistência à compressão do concreto, as fórmulas levam em consideração o tipo de agregado gráudo empregado. Estas variações podem ser vistas na tabela 01 e figura 02 a seguir.

Tabela 01: Valores do módulo de elasticidade estimados de acordo com a NBR 6118: 2014

fck (MPa)	Basalto	Granito	Calcário	Arenito
20	30,05	25,04	22,54	17,53
25	33,60	28,00	25,20	19,60
30	36,81	30,67	27,61	21,47
35	39,76	33,13	29,82	23,19
40	42,50	35,42	31,88	24,79
45	45,08	37,57	33,81	26,30
50	47,52	39,60	35,64	27,72

Fonte: Autoria Própria, 2021

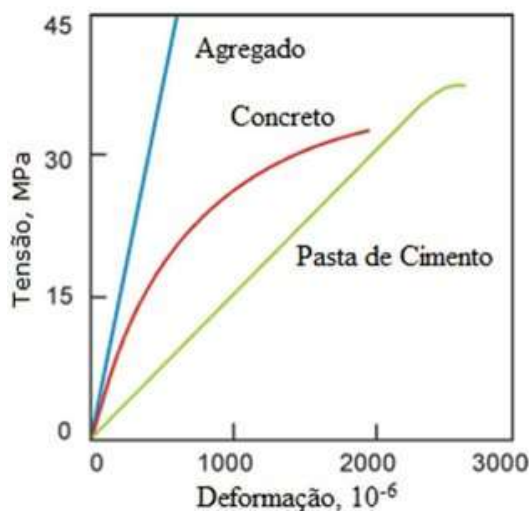
Gráfico 01: Valores do módulo de elasticidade estimados de acordo com a NBR 6118: 2014



Fonte: Autoria Própria, 2021

Pode ser notado (Figura 3) que, ao contrário do agregado e de algumas pastas de cimento, a deformação resultante da ação de uma carga em um corpo de prova de concreto mostra não ser diretamente proporcional a tensão aplicada.

Figura 02 - Comportamento típico da curva tensão-deformação para o concreto e seus principais componentes



Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Melo Neto e Helene (2002) descrevem que no caso do concreto, o comportamento deixa de ser linear um pouco antes de 50% da carga última, comportamento este explicado por vários

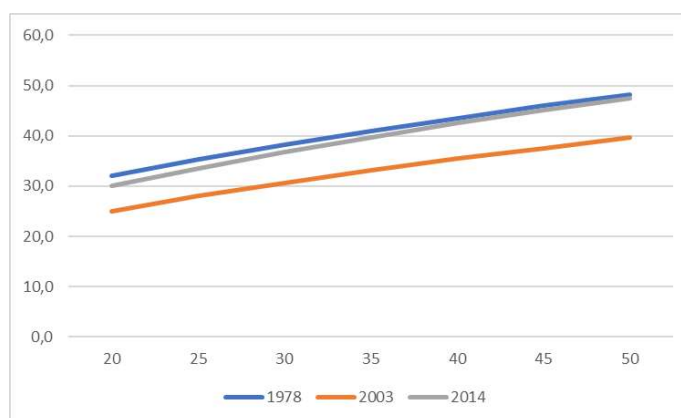
estudos sobre o processo de microfissuração progressiva do concreto sob cargas. O módulo de elasticidade do concreto é muito diferente do módulo de elasticidade dos materiais que o constitui. Os agregados graúdos têm um módulo variando a partir de 35 GPa e a pasta de cimento variando a partir de 16 GPa. A deformação do concreto provavelmente será um valor intermediário entre o módulo do agregado e do módulo da pasta.

Mehta e Monteiro (2014) relatam que há três tipos de módulos de elasticidade, sendo eles: o módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}); o módulo de elasticidade estático (E_c), que se divide em módulo tangente, módulo secante e módulo cordal; e o módulo de deformação à flexão.

De modo geral, a determinação dessa propriedade do concreto é mais complicada do que a determinação da resistência característica a compressão. Com isso, a maioria dos projetos estruturais utiliza o módulo de elasticidade determinado através de equações empíricas apresentadas pelas normas, que são relacionadas à resistência a compressão do concreto.

É interessante notar que ao longo do tempo, as fórmulas fornecidas pela NBR 6118 para estimar o módulo de elasticidade, na falta de determinação experimental, foram sendo modificadas para acompanhar a evolução dos materiais, particularmente do cimento. O gráfico abaixo traz um comparativo das estimativas do módulo de elasticidade nas versões da NBR 6118 de 1980, de 2003 e 2014.

Gráfico 2: comparativo das estimativas do módulo de elasticidade nas versões da NBR 6118 de 1980, de 2003 e 2014.



Fonte: Autoria Própria, 2021

Em 1980, o módulo de deformação longitudinal à compressão era estimado pela expressão:

$$E_c = 6600 \times (f_{cj})^{0,5} \text{ MPa}$$

Onde f_{cj} é igual a $f_{ck} + 3,5 \text{ MPa}$.

Já em 2003, o módulo de elasticidade tangente inicial poderia ser estimado empregando-se a expressão:

$$E_{ci} = 5600 \times f_{ck}^{0,5}$$

Finalmente, em 2014, o módulo de elasticidade tangente inicial para o concreto produzido com rochas basálticas (rocha mais comum na região de Jataí) como agregado graúdo, é dado pela expressão:

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times f_{ck}^{0,5}$$

Sendo que o valor de α_E para o basalto é igual a 1,2.

Para concretos de baixa resistência, como os utilizados até antes de 2003, onde era comum f_{ck} 180 kg/cm² e, até mesmo, 150 kg/cm², para estruturas, os valores do módulo de elasticidade em função da resistência pouco variavam e a equação prevista na norma era suficiente (PEDROSO, 2007).

Nos dias atuais, no entanto, onde esses concretos de baixa resistência não se enquadram nem mesmo na classe I de durabilidade da NBR 6118:2014 (que estabelece como condição mínima C20 para concreto armado em ambiente seco), o conhecimento dessa propriedade começa a ser importante para construir com qualidade e economia (PEDROSO, 2007).

Conforme estabelece a norma de projeto de estruturas de concreto, ABNT NBR 6118, o módulo de elasticidade do concreto deve ser determinado por ensaios realizados de acordo com a ABNT NBR 8522. Apenas nos casos em que não se disponha de resultados dos ensaios é que os valores de módulo podem ser estimados pela expressão matemática apresentada na norma de projeto.

Assim, é desejável que o projetista disponha dos valores de ensaio, que devem ser determinados a partir de um concreto preparado com os mesmos materiais e composição daquele que será usado na obra.

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Os materiais homogêneos, de acordo com o físico inglês Robert Hooke, mantém certa proporcionalidade entre a força aplicada e a deformação verificada. Essa teoria ficou conhecida como Lei de Hooke, que contempla os comportamentos elásticos dos materiais considerando baixas tensões e é explicitada da seguinte maneira:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E é uma constante dependente da composição do material;

σ é tensão definida como o quociente de carga instantânea aplicada na direção perpendicular e a área da seção reta original antes da aplicação da carga;

ε é a deformação específica definida como a relação entre a variação de comprimento em um dado instante e o comprimento inicial do corpo de prova.

O termo elasticidade está associado a capacidade que um material tem de retornar a sua forma e volume originais após atenuada a solicitação atuante. Esta propriedade depende da composição estrutural do material e das forças de elemento que compõe a microestrutura do material (MONTIJA, 2007). Existem vários métodos para avaliar o módulo de elasticidade de um material. É possível submeter o material a uma força de compressão e medir sua deformação. O quociente entre tensão e deformação, resulta o valor do módulo. Porém, esse método não é indicado para um material que possui um módulo alto, pois a deformação será mínima o que dificulta sua medição correta.

Segundo Vogt (2006), o módulo estático é apenas uma aproximação do módulo de elasticidade quando não existe linearidade na curva tensão-deformação. Pois esse método conduz a variação de até 20% para o mesmo material. Sendo assim, para os materiais que não atendem a Lei de Hooke, o módulo é medido através de ensaio de compressão/tração.

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido através da velocidade de pulsação ultrassônica, que é calculada a partir do tempo de propagação de pulsações mecânicas

ocasionadas eletronicamente. A estimativa mais próxima é obtida através da frequência natural de vibração do material.

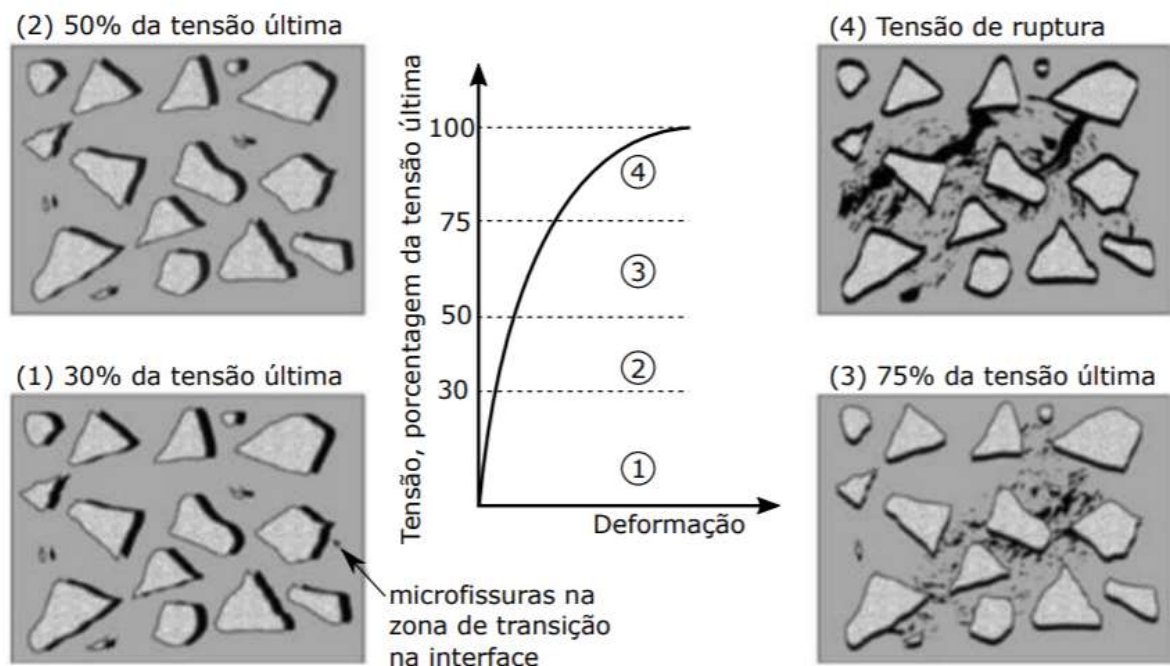
2.2 COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO

O concreto é resultado de misturas de elementos distintos e insolúveis entre si (agregados e cimento), sendo classificado assim como um material compósito, da qual se obtém um material com propriedades distintas dos seus constituintes separados (SILVA JUNIOR, 2010).

Dado que o concreto não é um material totalmente elástico, as relações tensão-deformação são muito complexas, além das deformações ao longo da peça de concreto serem distribuídas uniformemente. No entanto, para cargas inferiores a 30 % da carga última a curva tensão-deformação é linear, como efeito da estabilidade das fissuras na zona de transição (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Mehta e Monteiro (2008) relatam o comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão no que entende a microfissuração do concreto dividindo o nível de tensão em quatro estágios diferentes (Figura 3).

Figura 3- Representação do comportamento tensão-deformação do concreto sob compressão uniaxial



Fonte: Mehta; Monteiro, (2008)

Em até 30% da carga última, na zona de transição as fissuras continuam estáveis, com isso a curva tensão-deformação permanece linear. Após 30% da carga, há um aumento das microfissuras em comprimento, abertura e quantidade. Entre 50 e 60% da tensão última, outras fissuras se formam. A partir de 75% as fissuras se tornam instáveis, o que provoca uma inclinação ainda maior na curva. No último estágio, com a liberação da energia de deformação há um aumento das fissuras que se propagam chegando no rompimento do material (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

2.3 TIPOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

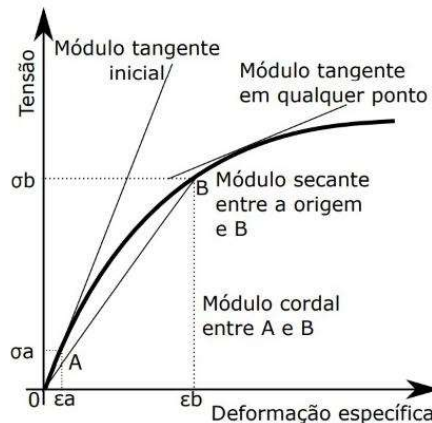
O módulo de elasticidade estático de um determinado material sob compressão ou tensão é dado pela declividade da curva σ - ϵ para o concreto sob carga axial. Dado que a curva do concreto é não-linear, três métodos para calcular o módulo podem ser utilizados, o que originou três tipos de módulo de elasticidade.

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

De acordo com Andrade (1997), o módulo tangente inicial na origem é utilizável para caracterizar a deformabilidade do concreto. Já o módulo tangente em um ponto genérico são aplicáveis quando há interesse na simulação de uma estrutura cuja carga acidental é grande em relação à carga permanente. E, finalmente, o módulo secante no primeiro carregamento é aplicável quando há interesse na simulação do carregamento de uma estrutura cuja carga permanente prevalece.

A figura 4, mostra os diferentes tipos de módulo de elasticidade obtidos a partir da curva σ - ϵ .

Figura 4 - Diferentes tipos de módulo de elasticidade



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

Quando se fala em módulo de elasticidade, normalmente está se referindo ao módulo de elasticidade na compressão. Porém, é possível determinar o módulo de elasticidade na tração, apesar de ser um ensaio de difícil execução. Seu valor pode ser determinado por tração direta ou através de medidas de deformações de corpos de prova submetidos à flexão. Entretanto, Neville (2017) considera que o módulo de elasticidade na tração tem praticamente o mesmo valor do módulo de elasticidade na compressão.

O módulo de deformação dinâmico, para uma deformação instantânea muito pequena, é dado aproximadamente pelo módulo de deformação tangente inicial, que parte da origem. É utilizado em estruturas que são submetidas a terremotos ou que sofreram algum tipo de impacto e pode ser medido por meio de ensaio ultrassônico (ANDRADE, 1997).

O ensaio de módulo de elasticidade pode ser realizado em qualquer idade e depende da estrutura que se pretende desenvolver (PEDROSO, 2007). Para a indústria de pré-moldados, por exemplo, os resultados de módulo de elasticidade devem ser conhecidos em prazos bastante curtos a partir da preparação e lançamento do concreto, muitas vezes menores que 24h. Em outras situações, a determinação do módulo de elasticidade aos 28 dias no início dos

trabalhos, como medida de controle das deformações, através do conhecimento da resistência à compressão obtida para o concreto, pode ser mais interessante.

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Em materiais homogêneos, existe uma direta relação entre o módulo de elasticidade e densidade. Como o concreto é um material heterogêneo e multifásico, a fração volumétrica, a densidade e o módulo dos principais componentes determinam o comportamento elástico do compósito. Visto que a densidade é inversamente proporcional à porosidade, naturalmente os fatores que afetam a porosidade do agregado, da matriz de pasta de cimento e da zona de transição na interface são importantes.

Com isso, o módulo de deformação do concreto pode ser afetado por diversos fatores, como mostrado anteriormente (figura 1).

2.4.1 Agregado

Os agregados influenciam significativamente nos resultados do módulo de elasticidade do concreto, principalmente os agregados graúdos. Entre as características do agregado graúdo que mais interferem no módulo de elasticidade do concreto, a porosidade é a mais importante. Isso se dá pelo fato de que a porosidade do agregado determina sua rigidez, que, por sua vez, controla a capacidade do agregado de restringir a deformação da matriz.

PEREIRA NETO (1994) demonstrou que a zona de transição é determinada pela natureza do agregado em seu estudo sobre as características de módulo de algumas rochas. Na tabela 2 é possível ver alguns resultados para diferentes tipos de rochas.

Tabela 02 – Resistência e Módulo de elasticidade de algumas rochas

ROCHAS	E
	(GPa)
Basalto	73
Calcário	79
Diabásio	75
Gnaisse	81
Granito	62

Fonte: PEREIRA NETO (1994)

Arndt (2007) pontua em seus estudos acréscimos de resistência de aproximadamente 10% quando os agregados graúdos com forma lamelar são substituídos pelos agregados com grãos cúbicos. Estes ganhos, oriundos da simples escolha do formato do agregado graúdo provocam ajustes nos teores de argamassa do traço do concreto.

Jacinto e Giongo (2005), relatam que mudança no diâmetro máximo de um agregado graúdo, de distribuição bem graduado e mesma mineralogia pode surtir dois efeitos contrários sobre a resistência à compressão do concreto.

Para os agregados graúdos o formato quebradiço e as superfícies angulares beneficiam consideravelmente, os concretos em termos de resistência e módulo. A compatibilidade dos materiais na produção dos concretos é um fator crítico para o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas.

Figura 5– Formato dos agregados graúdos



1. Grãos lamelares-brita comum

2. Grãos cúbicos

Fonte: ARNDT; et.al. 2007

Neville (1997) afirma que, o aumento da dimensão máxima característica do agregado até 38,1 mm diminui o consumo de água, de tal modo que, para uma mesma trabalhabilidade e o mesmo teor de cimento haverá um aumento da resistência a compressão

A proporção entre material inerte e pasta de cimento também altera o módulo de elasticidade (COLLEPARDI, 2005). Como já foi visto, para os concretos convencionais, o componente mais rígido é o agregado (geralmente com modo de elasticidade elevado) e o mais deformável é a pasta, como já mostrado. Quanto maior o conteúdo de inerte, tanto mais a curva tensão -

deformação do concreto se avizinhará da curva do agregado. Por outro lado, em concretos ricos em cimento, a curva tensão – deformação do concreto se avizinhará da curva da pasta.

2.4.2 Matriz da pasta de cimento

A matriz da pasta de cimento contribui para o aumento das deformações, o que requer estudo prévio e conhecimento de suas características. As principais influências estão atreladas ao seu grau de porosidade, grau de hidratação, temperatura, cura, umidade, teor de ar incorporado e a relação água-cimento.

As pastas de cimento hidratadas podem atingir valores de módulo de elasticidade entre 7 e 28 GPa. Estes valores são semelhantes aos módulos de elasticidade de agregados leves (MEHTA, MONTEIRO, 2014).

2.4.3 Zona de transição da interface da pasta e do agregado

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a zona de transição apresenta algumas diferenças em relação à pasta de cimento. Em geral, são mais comuns nesta região vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio.

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014) a resistência e o módulo de elasticidade do concreto não são afetados no mesmo grau pelo tempo de cura. Em idades mais avançadas, o módulo de elasticidade aumenta a uma taxa mais alta que a resistência à compressão. Isto se deve, provavelmente, à melhoria da densidade da zona de transição na interface.

2.4.4 Parâmetros de ensaio

Os parâmetros de ensaio também contribuem e podem trazer variações significativas para os resultados de módulo de elasticidade do concreto.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o estado de umidade do corpo de prova é um dos parâmetros de ensaio que representa uma variável importante no desempenho desta propriedade. Comparando ensaios realizados em corpos de prova ensaiados em condição úmida com os corpos de prova ensaiados na condição seca, houve aproximadamente 15% de diminuição da deformação em função da incompressibilidade da água acumulada nos poros do concreto.

A norma brasileira ABNT NBR 6118 (2014), prevê e estabelece corpos de prova cilíndricos com dimensões nominais de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para a realização dos ensaios. Outras dimensões são permitidas desde que cumpram de forma geral os requisitos das NBR 5738 e NBR 7680, sempre respeitando as devidas proporções entre comprimento/diâmetro em $L/d=2$.

A resistência do concreto pode ser influenciada pela velocidade de aplicação de carga. Sob aplicação de carga instantânea, apenas uma pequena deformação pode ocorrer antes da ruptura, e o módulo de elasticidade será muito alto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Já as taxas de cargas baixas, as deformações elásticas e de fluências ficariam então superpostas o que diminui ainda mais o módulo de elasticidade. Por esta razão, a NBR 8522: 2017 estabelece uma taxa de carregamento constante, como será visto adiante.

Helene (1998), conclui que, dada a quantidade de variáveis que podem estar envolvidas na determinação do módulo, a melhor maneira de serem analisados seria pela utilização de um conjunto de resultados e não individualmente.

2.5 COMO ESTIMAR O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Sabe-se que o módulo de elasticidade aumenta em função da resistência a compressão, porém, não existe um consenso com relação à forma de se estimar estes valores, a partir dos dados obtidos nos ensaios de resistência a compressão.

A seguir, apresentam-se as equações empíricas das normas técnicas que são geralmente usadas para estimar e analisar as propriedades mecânicas, principalmente quando não existem ensaios de concretos feitos com os seus respectivos materiais caracterizados que serão usados na obra. Habitualmente essas equações empíricas são em função da resistência à compressão, resistência característica, massa específica, tipo de agregado, dentre outras.

2.5.1 ABNT NBR 6118 (2014)

De acordo com a norma brasileira, ABNT NBR 6118 (2014) o módulo de elasticidade do concreto, E_{ci} , deve ser estimado e seus valores utilizados no cálculo de estruturas, apenas na ausência de ensaios realizados de acordo com a NBR 8522: 2017, conforme as expressões mostradas abaixo:

Para concretos de f_{ck} de 20 a 50 MPa:

$$E_{ci} = \alpha E \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ (Equação 2)}$$

Para concretos de f_{ck} de 55 a 90 MPa:

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

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa;

αE = Fatores de correção de 1,2 para basalto e diabásio; 1,0 para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

f_{ck} = Resistência característica do concreto, em MPa.

O módulo de deformação secante (E_{cs}) pode ser estimado do valor obtido para o módulo de elasticidade do concreto (E_{ci}) $0,3 f_{ck}$, pela equação dada abaixo:

$$E_{cs} = 0,8 + 0,2 \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \cdot E_{ci} \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de deformação secante, em GPa;

E_{ci} = Módulo de elasticidade do concreto, em GPa.

2.5.2 CEB-FIP Model Code (2013)

Para o comitê Euro-Internacional, o módulo de elasticidade do concreto $E_{ci} = 0,4 f_{cm}$, deve ser estimado para cálculo de estruturas pela expressão mostrada pela Equação 4;

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha E \left(f_{ck} + \frac{8}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ (Equação 5)}$$

$$E_{ci}(t) = E_{ci} \cdot \exp \left\{ s \left[1 - \frac{28}{t} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

E_{ci} = Módulo de elasticidade aos 28 dias, em GPa;

$E_{ci}(t)$ = Módulo de elasticidade em idade diferente de 28 dias;

α_E = Fatores de correção de 1,2 para basalto e diabásio; para granito e gnaisse; 0,9 para calcário e 0,7 para arenito.

F_{ck} = Resistência característica do concreto, em Mpa.

Já o módulo de deformação secante (E_c) pode ser estimado pela equação dada abaixo:

$$E_{cs} = 0,80 + 0,20 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{88} \right) E_c \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

E_{cs} = Módulo de deformação secante, em GPa;

E_{ci} = Módulo de elasticidade, em GPa

F_{ck} = Resistência característica do concreto, em Mpa.

2.5.3 Eurocode2 (2004)

Para a especificação do Eurocode2, o módulo de elasticidade (E_c) $0,4 f_{cm}$, pode ser estimado para o cálculo das estruturas pelas equações dadas abaixo:

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm} \quad (\text{Equação 8})$$

$$E_c(t) = 1,05 \cdot \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

E_c = Módulo tangente de elasticidade do concreto com peso normal, em GPa;

E_{cm} = Módulo secante de elasticidade do concreto, em GPa;

$E_c(t)$ = Módulo de elasticidade em idades diferentes que 28 dias, em GPa;

O módulo de deformação secante (E_{cm}) pode ser estimado pelas expressões abaixo:

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

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,2} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

E_{cm} = Módulo secante de elasticidade do concreto, em GPa;

E_{cd} = Valor de projeto do módulo secante de elasticidade do concreto, em GPa;

f_{cm} = Resistência média do concreto, em MPa.

2.5.4 ACI 318 (2011)

A normalização americana, sugere que o módulo de elasticidade, E_c a $0,45 \cdot f'_c$, para ser estimado utilize as seguintes equações:

Massa específica do concreto entre 1.440 a 2.560 kg/m³:

$$E_c = \omega c^1 \cdot 0,043 \cdot f'_c \frac{1}{2} \quad (\text{Equação 12})$$

Para massa específica normal do concreto:

$$E_c = 4,73 f'_c \frac{1}{3} \quad (\text{Equação 12})$$

Sendo:

E_c = Módulo de elasticidade do concreto, em GPa;

ω_c = Massa específica aparente do concreto em análise, kg/m³;

f'_c = Resistência a compressão do concreto especificada, em Mpa.

2.6 COMO MEDIR O MÓDULO DE ELASTICIDADE

Diversos métodos de ensaio podem ser utilizados para o controle do valor do módulo de elasticidade. Algumas das formas conhecidas e normalizadas no Brasil e no exterior, apresentam-se a seguir, a fim de determinar esta grandeza de forma estática e dinâmica.

2.6.1 Métodos estáticos

2.6.1.1 ABNT NBR 8522 (2017)

Os corpos de prova prescritos por esta norma devem ser cilíndricos, moldados e curados de acordo com a ABNT NBR 5738.

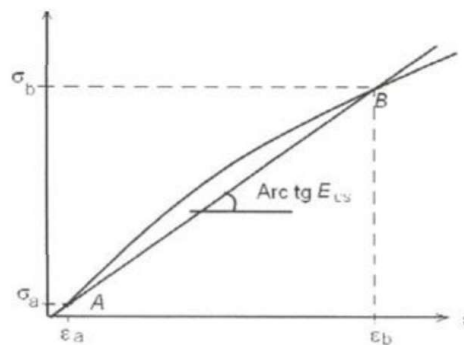
A máquina de ensaio deve atender aos valores máximos admissíveis da classe 1 e cumprir os requisitos da ABNT NBR 5739. Deve ser capaz de aplicar a força ou deformação específica indicada na razão especificada e mantê-la no nível requerido.

Os instrumentos para medir as deformações podem ser elétricos ou mecânicos e devem possibilitar a realização de ensaios sem a interferência de operadores em suas medições.

Antes da determinação do módulo de elasticidade, deve ser medida a resistência à compressão do concreto (f_c), que será a média dos resultados de no mínimo dois corpos de prova similares, do mesmo tamanho e forma dos corpos de prova destinados à determinação do módulo de elasticidade.

O módulo de deformação secante é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão – deformação específica, passando pelos seus pontos A e B correspondentes, respectivamente, à tensão σ_a e a tensão considerada no ensaio, como mostra a figura abaixo.

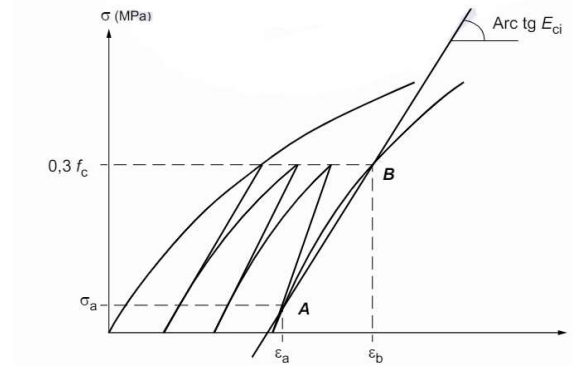
Figura 6: representação do módulo de deformação secante (E_{cs})



Fonte: Adaptado de NBR 8522 (2008)

O módulo de deformação tangente à origem ou inicial é considerado equivalente ao módulo de deformação secante ou cordal, entre σ_a e 30% de f_c para o carregamento estabelecido neste método de ensaio, conforme figura a seguir.

Figura 7: Representação do módulo de deformação tangente inicial (E_{ci})



Fonte: Adaptado de NBR 8522 (2008)

Embora esta norma inclua procedimentos para a determinação do módulo tangente inicial e secante para uma dada tensão, a NBR 6118 (2014) menciona apenas o primeiro, que deve ser especificado no projeto e controlado por meio de ensaios.

Para a determinação do módulo de elasticidade são aplicados carregamentos com uma velocidade de $0,45 \pm$ MPa até que seja alcançada a tensão de $0,3 f_c$, após é feito o descarregamento, com a mesma velocidade, até uma tensão próxima de zero. Este ciclo é repetido três vezes. A seguir, carrega-se o corpo de prova até sua ruptura e a resistência à compressão não deve diferir da obtida anteriormente de mais de 20%.

2.6.2 Métodos dinâmicos

O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela vibração de um corpo de prova com a aplicação de uma tensão insignificante. Como a tensão é baixa, não há a indução de microfissuras no concreto. Dessa forma, o módulo dinâmico se refere a efeitos quase puramente elásticos (NEVILLE, 2016). Por essa razão, o módulo tangente inicial e o módulo dinâmico são aproximadamente iguais.

Neville (2016) também aponta que a relação entre o módulo estático (E_c) e o módulo dinâmico (E_d), que possui um valor menor que a unidade, é maior para concretos de resistência mais elevada. Não existe uma correlação fixa entre E_c e E_d e, portanto, não é possível a estimativa de E_c a partir de E_d – de mais fácil determinação.

Segundo ISAÏA (2011) o módulo de elasticidade dinâmico, também conhecido como módulo de elasticidade longitudinal do concreto, pode ser determinado por ensaios não destrutivos. Os ensaios relacionam com a propagação de ondas de ultrassom no corpo de prova ou a

frequência natural de vibração do corpo de prova. Para estes ensaios não existe norma brasileira.

CAPITULO 3 METODOLOGIA

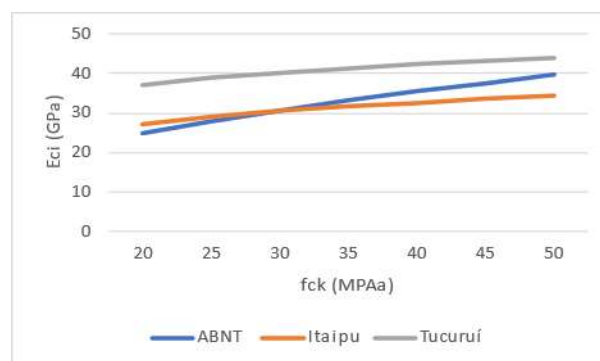
Será realizado um estudo teórico com o objetivo de investigar a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto na idade de 28 dias. Para tanto, serão pesquisados dados na literatura brasileira, que relacionam estas duas grandezas. Em seguida, estes dados serão comparados com os valores obtidos pelas expressões dadas na NBR 6118: 2014 (item 2.4.5.1).

Com os valores encontrados, será possível determinar se há a necessidade da realização de ensaios para a determinação do módulo de elasticidade conforme a NBR 8522: 2017, ou se as equações propostas pela norma dão uma aproximação aceitável.

Tabela 03: Comparação do módulo de elasticidade calculadas pela NBR 6118:2014 e NBR8522:2017

Fck (MPa)	ABNT	Itaipu	Tucuruí
20	25,04	27,38	37,16
25	28,00	29,08	38,84
30	30,67	30,47	40,22
35	33,13	31,65	41,39
40	35,42	32,67	42,40
45	37,57	33,56	43,29
50	39,60	34,37	44,08

Figura 8: Comparação entre o módulo de elasticidade calculados e experimentais



Fonte: ANDRADE, 1997.

CAPITULO 4 RESULTADOS

Para verificar um dos objetivos deste trabalho, a influência do agregado graúdo no módulo de Elasticidade, realizou-se a análise dos valores encontrados em dissertações e teses, exclusivamente os dados que tratam do basalto, mesma rocha utilizada em Jataí-Goiás.

A norma brasileira, antes da revisão, contemplava exclusivamente o termo f_{ck} em sua equação de previsão e, de acordo com Araújo (2008) correlações do módulo de elasticidade que levam em consideração a resistência à compressão estão sujeitas a erros grosseiros. Dessa maneira, com a última revisão da NBR 6118 datada de 2014, observou-se um acordo da norma brasileira de levar em consideração a influência do tipo do agregado graúdo utilizado na produção do concreto, através do termo α_E . Na tabela 4 estão especificadas as equações da Norma brasileira que sofreram alterações ao longo dos anos.

Tabela 04: Expressões da NBR 6118 para a estimativa do módulo de elasticidade

Norma	item	Expressão	Observação
ABNT NBR 6118:1980	8.5.2	$6600 \cdot \overline{f_{c_j}}$	$f_{c_j} = f_{ck} + 3,5 MPa$
ABNT NBR 6118:2003	8.2.8	$E_{ci} = 5600 \cdot f_{ck}^{\frac{1}{2}}$	
ABNT NBR 6118:2014	8.2.8	$20 MPa < f_{ck} < 50 MPa$ $E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \overline{f_{ck}}$ $55 MPa < f_{ck} < 90 MPa$ $E_{ci} = 5700 \alpha_E \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{\frac{1}{3}}$	arenito, $\alpha_E = 0,7$ calcário, $\alpha_E = 0,9$ granito e gnaisse, $\alpha_E = 1,0$; basalto, $\alpha_E = 1,2$;

Fonte: Autoria Própria, 2021

4.1 Valores de concretos dosados em uma central localizada na cidade de Lajeado/RS

Inicialmente analisou-se a influência dos basaltos nos valores de E_{ci} , tomando se somente os valores aos 28 dias de idade.

Os valores do módulo de elasticidade e resistência a compressão obtidos por meio de pesquisa são apresentados na tabela 5.

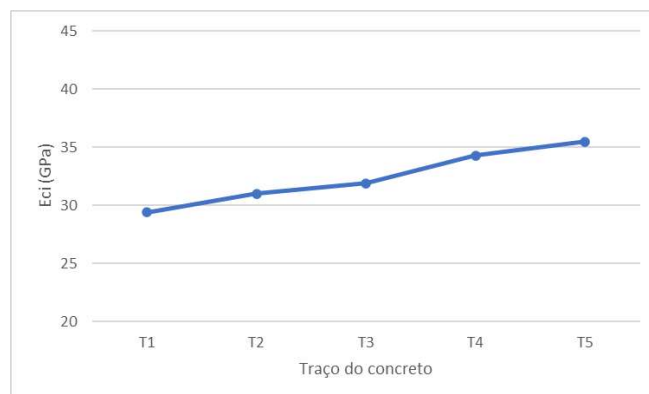
Tabela 05: Valores de Eci de todos os concretos

Grupo	Traço	Fck (Mpa)	Eci (Gpa)
A	T1	28,3	29,4
	T2	32,5	31
	T3	39	31,9
	T4	46,5	34,3
	T5	55,6	35,5
B	T6	26,9	31,3
	T7	38,3	35,2
	T8	45,9	36,4
	T9	55,1	36,9
	T10	65,4	37,7
C	T11	25	30
	T12	35,1	32
	T13	37,7	32,3
	T14	45,4	33,2
	T15	52,9	34,4
D	T16	27,7	29,7
	T17	37,7	30,5
	T18	43,7	32,2
	T19	51,4	33,7
	T20	58,8	35,7

Fonte: Adaptado KUMMER, Lucas (2016)

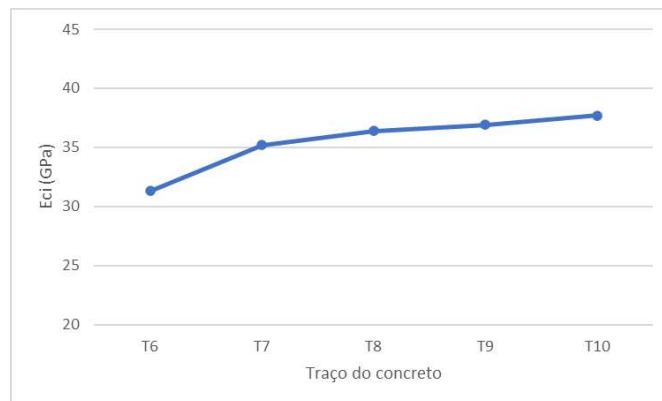
As Figuras 9 a 12 mostram os gráficos com os resultados obtidos de módulo de elasticidade dos concretos analisados.

Figura 9– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo A



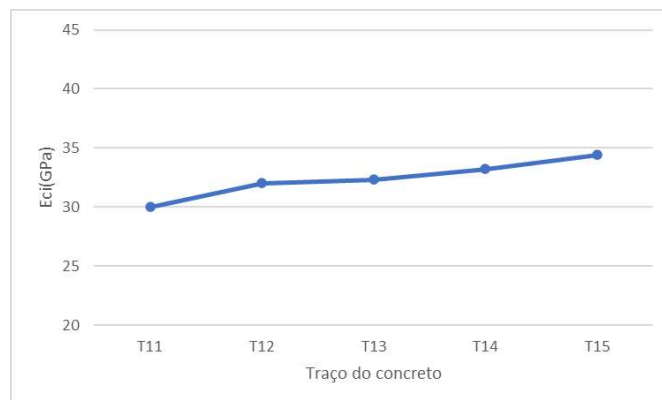
Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 10 – Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo B



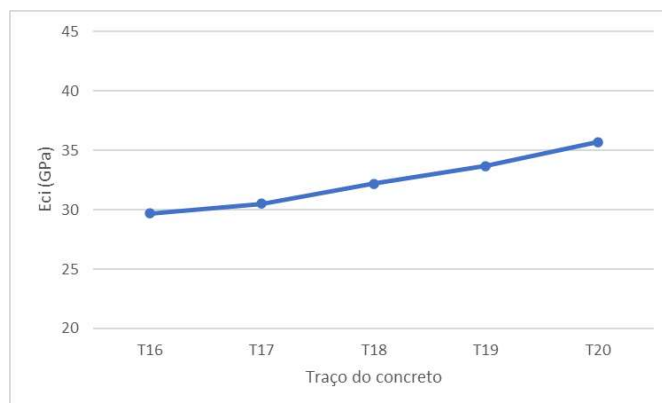
Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 11– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo C



Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 12– Módulo de elasticidade aos 28 dias do grupo D



Fonte: Autoria Própria, 2021

A tabela a seguir apresenta os valores de Eci calculados utilizando a equação da NBR 6118:2014 para os valores de fck encontrados nesse estudo.

Tabela 06– Comparação entre os valores de Eci encontrados e calculados pela equação da NBR 6118:2014

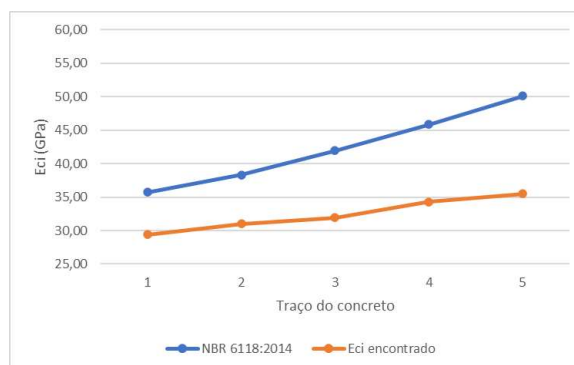
Grupo	Traço	Fck (Mpa)	Eci(Gpa)	Eci(Gpa) NBR6118:2014
A	T1	28,3	29,4	35,75
	T2	32,5	31	38,31
	T3	39	31,9	41,97
	T4	46,5	34,3	45,82
	T5	55,6	35,5	50,11
B	T6	26,9	31,3	34,85
	T7	38,3	35,2	41,59
	T8	45,9	36,4	45,53
	T9	55,1	36,9	49,88
	T10	65,4	37,7	54,34
C	T11	25	30	33,60
	T12	35,1	32	39,81
	T13	37,7	32,3	41,26
	T14	45,4	33,2	45,28
	T15	52,9	34,4	48,88
D	T16	27,7	29,7	35,37
	T17	37,7	30,5	41,26
	T18	43,7	32,2	44,42
	T19	51,4	33,7	48,18
	T20	58,8	35,7	51,53

Fonte: Adaptado KUMMER, Lucas (2016)

Os valores de módulo de elasticidade aos 28 dias obtidos pela norma brasileira trouxeram valores médio no grupo A de 35,75 a 50,11 GPa, o grupo B apresentou valores de 34,85 a 54,34 GPa, o grupo c apresentou valores 33,60 a 48,88 GPa e o grupo D, de 35,37 a 51,53 GPa.

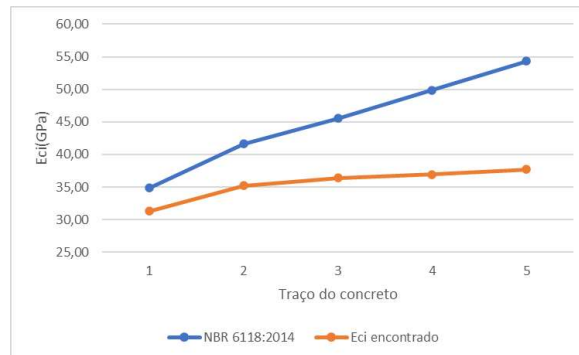
A figura 13 mostra o gráfico comparativo entre os valores de Eci encontrados na pesquisa e calculados conforme a norma brasileira já citada.

Figura 13– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo A.



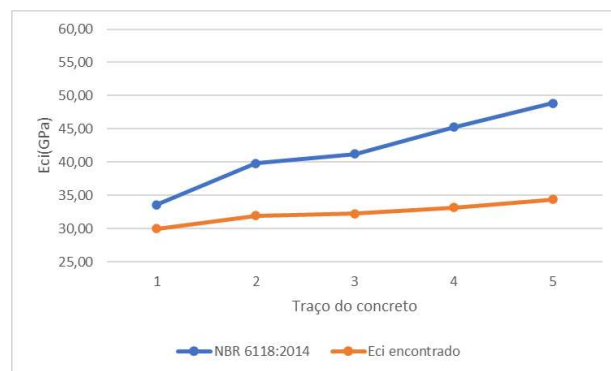
Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 14– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo B.



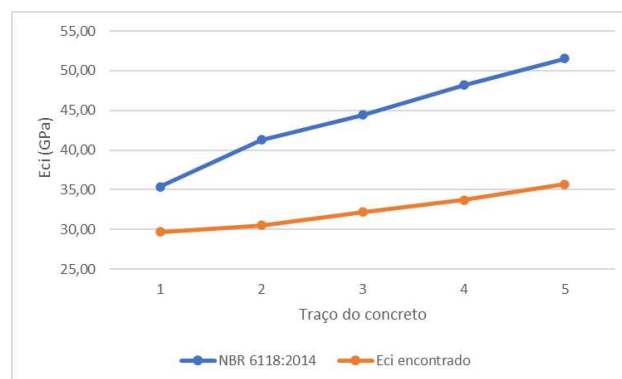
Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 15– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo C.



Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 16– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014 grupo D.



Fonte: Autor

É possível observar nos traços dos concretos com resistência mais baixas, a NBR 6118:2014 resultaram valores semelhantes aos encontrados na pesquisa, porém, quando há um aumento da resistência, essa diferença se torna cada vez maior para o f_{ck} 50 Mpa.

4.2 Valores de concreto produzidos com agregados de Uberlândia (UDIA), Uberaba (UBERA)

Na tabela 7 são apresentados os resultados encontrados para os valores de módulo de elasticidade.

Tabela 07 – Valores de modulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado basáltico para os traços C20, C30 e C40.

Traço	Eci (Gpa)	Eci (Gpa)NORMA 6118:2014	Fck (Mpa)
C20-BA-UDIA	35,06	36,49	29,48
C30-BA-UDIA	40,96	40,1	35,61
C40-BA-UDIA	52,8	47,3	49,54
C20-BA-UBERA	42,38	40,04	35,5
C30-BA-UBERA	43,17	43,64	42,18
C40-BA-UBERA	53,7	47,28	49,5

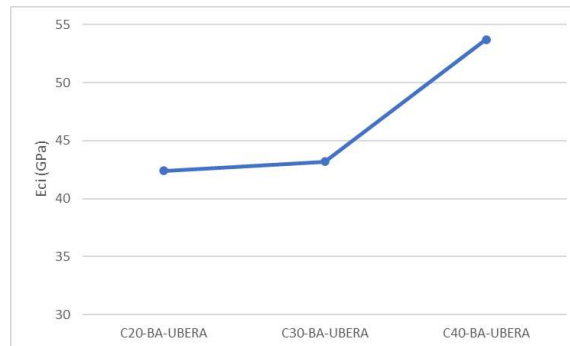
Fonte: Adaptado Arruda, A.M. (2013)

Figura 17– Modulo de elasticidade aos 28 dias (UDIA)



Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 18- Módulo de elasticidade aos 28 dias (UBERA)



Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 08– Comparação entre os valores encontrados e valores calculados pela NBR 6118:2014.

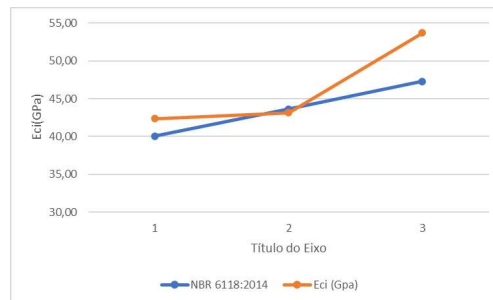
Traço	Eci (Gpa)	Eci (Gpa)NORMA 6118:2014	Fck (Mpa)
C20-BA-UDIA	35,06	36,49	29,48
C30-BA-UDIA	40,96	40,1	35,61
C40-BA-UDIA	52,8	47,3	49,54
C20-BA-UBERA	42,38	40,04	35,5
C30-BA-UBERA	43,17	43,64	42,18
C40-BA-UBERA	53,7	47,28	49,5

Fonte: Adaptado Arruda, A.M. (2013)

Comparando os resultados dos módulos de elasticidade, constata-se que os valores para os concretos C20-BA-UDIA, C20-BA-UBERA e C30-UBERA apresentaram valores da NBR 8522:2017 superestimados pela NBR 6118:2014.

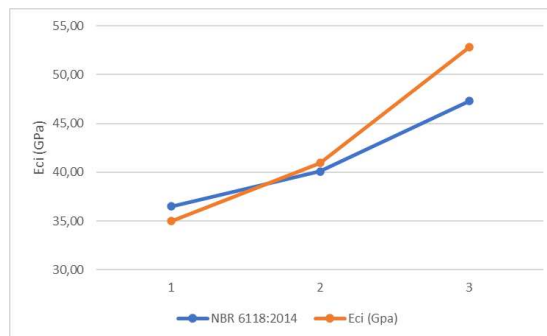
O comportamento dos traços C30-BA-UDIA, C40-BA-UDIA e C40-BA-UBERA foram menores que os valores encontrados utilizando a NBR 6118:2014.

Figura 19– Comparação entre os valores encontrados para Basalto-UBERA e valores calculados pela NBR 6118:2014



Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 20– Comparação entre os valores encontrados para Basalto-UDIA e valores calculados pela NBR 6118:2014



Fonte: Autoria Própria, 2021

4.3 Valores de concreto produzidos com Basalto oriundo de Toledo-PR, Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR

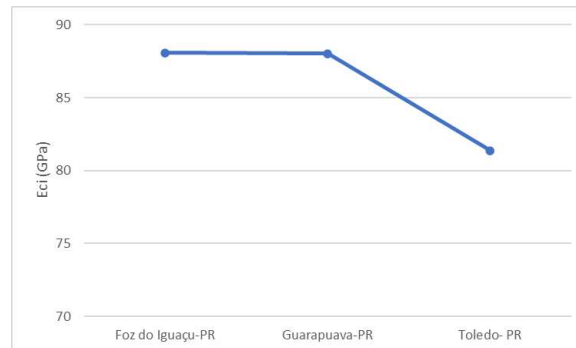
Os valores do módulo de elasticidade e resistência a compressão obtidos por meio de pesquisa são apresentados na tabela 9.

Tabela 09- Valores de modulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado basáltico

Origem Mineralógica	Eci (Gpa)	Eci (Gpa) NBR 6118:2014	fck(Mpa)
Foz do Iguaçu-PR	88,06	33,13	24,3
Guarapuava-PR	88,01	32,77	23,78
Toledo- PR	81,38	29,89	19,79

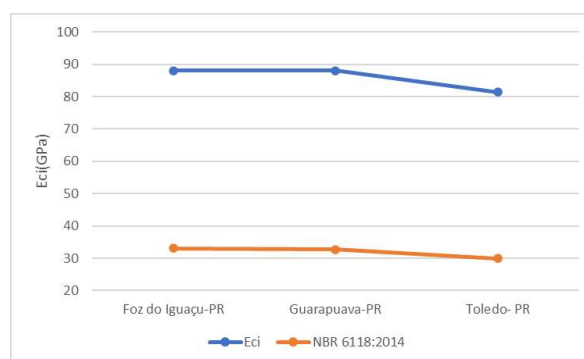
Fonte: Adaptado THOMAZ, William (2020)

Figura 21- Módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregado basáltico NBR 8522:2017



Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 22– Comparação entre os valores encontrados para Basalto e valores calculados pela NBR 6118:2014



Fonte: Autoria Própria, 2021

O concreto com o basalto de Toledo-PR teve resultados de módulo de elasticidade menores do que os concretos com o mesmo agregado de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR.

4.3 Comparação dos valores do módulo de elasticidade entre a equação de Dal Molin e NBR 6118:2014

O modelo de previsão do módulo de elasticidade a partir da resistência a compressão estimado por Dal Molin (1996) resultou em

$$E_c = 9570 f_c^{0.31} \text{ (Equação 13)}$$

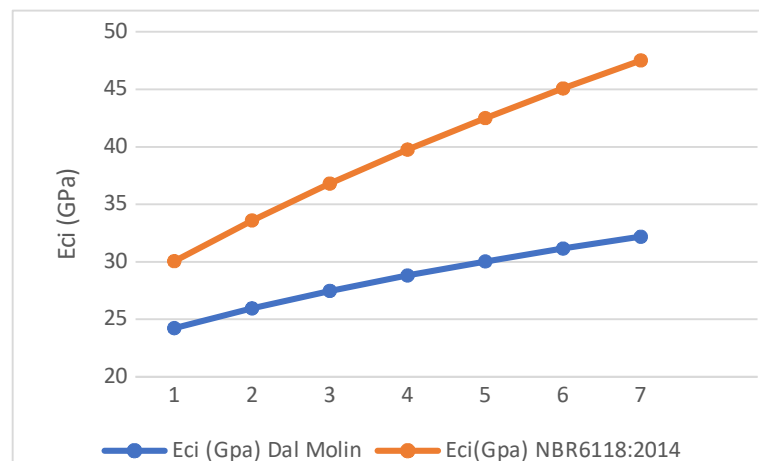
Os valores do módulo de elasticidade obtidos por meio de cálculos são apresentados na tabela 10.

Tabela 10- Valores de modulo de elasticidade dos concretos para diferentes valores de resistência a compressão

Traço	fck (Mpa)	Eci (Gpa) Dal Molin	Eci(Gpa) NBR6118:2014
C20	20	24,23	30,05
C25	25	25,95	33,60
C30	30	27,47	36,81
C35	35	28,81	39,76
C40	40	30,03	42,50
C45	45	31,15	45,08
C50	50	32,18	47,52

Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 23- Comparação entre os valores calculados pela equação Dal Molin e NBR 6118:2014



Fonte: Autoria Própria, 2021

As curvas obtidas na Figura 23 mostra que para os níveis mais baixos da resistência, os valores diferem menos do que nos valores mais elevados.

CAPÍTULO 1 CONCLUSÃO

Por este trabalho foi possível adquirir conhecimento a respeito do módulo de elasticidade (E_c), fatores que podem influenciar no seu valor e os métodos para sua determinação. Na análise da influência do agregado graúdo no módulo de elasticidade, foi possível verificar que o concreto produzido com agregado basáltico sofreu bastantes alterações, quando se compara os valores resultantes da NBR 8522:2017 com os valores obtidos pelas equações propostas pela NBR 6118:2014. Possivelmente essas diferenças nos resultados, utilizando os coeficientes de correção, seja devido a versatilidade das características das rochas.

Diante do exposto pode-se notar que o modelo proposto pela norma brasileira NBR 6118(ABNT,2014) para a previsão do módulo não representa os valores reais, pois diferentes jazidas podem produzir diferentes materiais. Vale frisar que é importante considerar todas as variáveis que são significativas para o módulo de elasticidade do concreto para elaborar o modelo de previsão, pois quando considerado apenas o f_{ck} e o tipo de agregado graúdo, pode-se cometer erros.

Neste sentido, este trabalho contribuiu em fornecer informações a respeito do módulo de elasticidade estático de concretos produzidos com diferentes agregados de basalto, mesmo agregado utilizado na região de Jataí-Goiás. É importante salientar que os resultados encontrados pela NBR 8522:2017 devem, geralmente, ser maiores aos calculados pela NBR 6118:2014 que devem fornecer valores que preservem a segurança.

Com propósito de acrescentar conhecimento a respeito do módulo de elasticidade, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Medição do módulo de elasticidade dos concretos produzidos pelas concreteiras de Jataí- Goiás.
- Rever o coeficiente indicado na NBR 6114 (ABNT, 2014) para agregados de origem basáltica para determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resistência à compressão.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Walton Pacelli de. **Concretos Massa, Estrutural, Projetado e Compactado com Rolo**. São Paulo: Editora Pini, 1997.
- ARAÚJO, Suélio da Silva; GUIMARÃES, Gilson Natal; GEYER, André Luiz Bortolacci. **Influência de Fatores de Ensaio que Interferem na Determinação do Módulo Estático de Elasticidade do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2012;
- ARAÚJO, J. M. Modelos de previsão do módulo de deformação longitudinal do concreto: NBR 6118 versus CEB. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, nº12, 2008
- ARNDT, J.A.; J.; BIANCHINI, M. Influencia do Índice de forma do agregado graúdo na resistencia do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2007, Bento Gonçalves.
- COLLEPARDI, Mario. **Il Nuovo Calcestruzzo**. 4 ed. Edizioni Tintoretto: Milão, 2006.
- DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. **Contribuição ao estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. São Paulo: EPUSP, 1996.
- HELENE, P.R.L. Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e características do concreto fresco e endurecido. Escola Politécnica da universidade de São Paulo. Relatório Técnico nº 10.1222. Associação Brasileira de Portland. São Paulo. 1998.
- JACINTHO, A.E.P.G.A.; GIONGO, J.S. Resistencia mecanica do concreto. In: ISAIA, G.C. (Org). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.
- KUMMER, Lucas. **Resistencia a compressão e módulo de elasticidade dos concretos de uma central dosadora de concreto de lajeado/RS**. 2016. Monografia (Bacharel em engenharia civil) - Centro universitário UNIVATES, [S. l.], 2016.
- NBR 6118. 2014**. Projeto de estruturas de concreto -. *NBR 6118:2014*. s.l.: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

NBR 8522: 2017. Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade e de deformação à compressão. NBR 8522:2017: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

MALHOTRA, V.M. (1986). Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods. ACI Monograph nº 9. The Iowa State University Press.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 4 ed. IBRACON: São Paulo, 2014;

METHA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** IBRACON: São Paulo, 2008;

MELO NETO, Antônio A. de; HELENE, Paulo R. L. **Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos.** São Paulo: IBRACON, 2002;

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

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5 ed. Bookman: Porto Alegre, 2016.

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

PEDROSO, Fábio Luís. Módulo de elasticidade é parâmetro fundamental para a durabilidade de estruturas de concreto. **Concreto e Construção.** São Paulo, n. 48, p. 85-89, out./dez., 2007.

THOMAZ, William de Araújo. **Contribuição ao estudo do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos contendo agregados basálticos: Análise experimental e proposta de modelo de correlação.** 2020. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

VOGT, J. C. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência a fadiga e na tenacidade a fratura para concretos convencionais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2006.

THOMAZ, William. **CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS BASÁLTICOS: ANÁLISE EXPERIMENTAL E PROPOSTA DE MODELO DE CORRELAÇÃO.** 2020. Monografia (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, [S. l.], 2020.