



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE
DOS CONCRETOS DE UMA CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO
DE LAJEADO/RS**

Lucas Marcel Kummer

Lajeado, novembro de 2016

Lucas Marcel Kummer

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE
DOS CONCRETOS DE UMA CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO
DE LAJEADO/RS**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa I do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Ma. Betina Hansen.

Lajeado, novembro de 2016

Lucas Marcel Kummer

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE
DOS CONCRETOS DE UMA CENTRAL DOSADORA DE CONCRETO
DE LAJEADO/RS**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Ma. Betina Hansen – orientadora
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. Rafael Mascolo
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. Antônio Pregeli Neto
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, novembro de 2016

AGRADECIMENTOS

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 grato por isso.

Começo agradecendo aos meus familiares, especialmente os meus pais e avós que sempre colocaram a educação como prioridade, me oportunizando as melhores condições para seguir estudando. Por terem me apoiado nos momentos mais difíceis e me incentivarem a continuar lutando em busca dos meus sonhos.

À minha namorada que sempre esteve ao meu lado, me auxiliando, me apoiando e também servindo de inspiração na trajetória acadêmica.

Ao Eng. Flavio Roberto Bartz, que além de um grande chefe, é também um exemplo de profissional. Agradeço por me incentivar a querer buscar dar o meu melhor no trabalho e na graduação.

Aos meus professores(as), pelos tantos anos de convivência em sala de aula e corredores, anos esses em que aprendi com eles não só os conteúdos das disciplinas necessários para a minha prática profissional, mas também valores éticos e morais.

À professora mestra Betina Hansen que me orientou com muito empenho e dedicação na construção deste trabalho, por entender que a construção do conhecimento é uma via de mão dupla, onde pude aprender com ela, mas também pude dialogar abertamente sobre novas ideias.

Ao técnicos e estagiários do LATEC (Laboratório de Tecnologias de Construção) da UNIVATES que me auxiliaram na realização dos ensaios, possibilitando assim a conclusão deste trabalho.

Aos amigos e colegas de curso que de alguma forma contribuíram na minha graduação, de forma direta ou indireta.

RESUMO

Muitos problemas relacionados à deformabilidade das estruturas estão em discussão atualmente, o que torna cada vez mais importante o conhecimento do módulo de elasticidade do concreto. Porém, devido à grande diversidade dos materiais empregados nos concretos no Brasil, os modelos de previsão para o módulo de elasticidade apresentados por diversas normas resultam em valores diferentes entre si. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de concretos produzidos por uma central dosadora de concreto da cidade de Lajeado/RS. A partir deste estudo foi proposta uma equação para estimativa do módulo de elasticidade destes concretos, que esteja adequada aos materiais e dosagens da central dosadora estudada. A moldagem dos corpos de prova foi realizada em laboratório, utilizando diferentes classes de resistência e abatimento, e variando também a dimensão máxima característica do agregado graúdo. Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos foram realizados para as idades de controle de 3, 7, 28 e 63 dias. Os resultados dos ensaios possibilitaram também estimar a resistência à compressão em uma certa idade a partir da resistência aos 28 dias.

Palavras-chave: Concreto. Resistência à compressão. Módulo de elasticidade.

ABSTRACT

Many problems related to the deformability of the structures are being discussed nowadays, which makes it increasingly important to know the modulus of elasticity of concrete. However, due to the great diversity of the materials used in concrete in Brazil, the prevision models for modulus of elasticity presented by different standards result in different values. Thus, this research aims to study the relationship between the compressive strength and modulus of elasticity of concrete produced by a concrete batching plant in the city of Lajeado/RS. From this study was proposed an equation to estimate the modulus of elasticity of these concretes, appropriated to materials and dosages of the concrete batching plant studied. The specimens were molded in laboratory, using different strength and slump classes, and also varying the maximum size of coarse aggregate. Concrete compressive strength and modulus of elasticity tests were made at 3, 7, 28 and 63 days. The results of the tests also made it possible to propose an equation to estimate the concrete compressive strength at a certain age from the 28-day strength.

Keywords: Concrete. Compressive strength. Modulus of elasticity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c do concreto.....	17
Figura 2 - Influência da relação a/c e idade de cura na resistência do concreto.....	18
Figura 3 - Influência da relação a/c, ar incorporado e consumo de cimento na resistência do concreto	19
Figura 4 - Influência das condições de cura sobre a resistência do concreto	21
Figura 5 - Influência das temperaturas de moldagem e cura na resistência do concreto	22
Figura 6 - Resistência média à compressão me função da classe de resistência do concreto	24
Figura 7 - Diferentes tipos de módulo de elasticidade.....	25
Figura 8 - Ciclos de carregamento e descarregamento para determinação de E_{ci}	27
Figura 9 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados	28
Figura 10 - Efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade médio do concreto.....	29
Figura 11 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o fator a/c.....	30
Figura 12 - Módulo de deformação médio em função do tamanho do corpo de prova.....	31
Figura 13 - Módulo estático de elasticidade, por dimensão do corpo de prova, tipo de concreto e medidor de deformação	32
Figura 14 - Gráfico da granulometria dos agregados miúdos.....	40
Figura 15 - Distribuição granulométrica da Brita 0 e Brita 1	40
Figura 16 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo A.....	48
Figura 17 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo B.....	49
Figura 18 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo C.....	49
Figura 19 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo D.....	50
Figura 20 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo A.....	50
Figura 21 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo B.....	51
Figura 22 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo C.....	51
Figura 23 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo D.....	52
Figura 24 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade de todos os concretos.....	52
Figura 25 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo A.....	54
Figura 26 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo B.....	54
Figura 27 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo C.....	55
Figura 28 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo D.....	55
Figura 29 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo A.....	56
Figura 30 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo B.....	56
Figura 31 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo C.....	57

Figura 32 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo D.....	57
Figura 33 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade de todos os concretos.....	58
Figura 34 - Relação entre f_{cmj}/f_{cm} e E_{cij}/E_{ci} para todos os concretos.....	58
Figura 35 - Relação entre E_{cij} e f_{cmj} dos concretos.....	59
Figura 36 - Relação entre E_{cij} e f_{cmj} para diferentes classes de abatimento.....	60
Figura 37 - Relação entre E_{cij} e f_{cmj} para diferentes dimensões máximas dos agregados graúdos.....	60
Figura 38 - Comparação entre a equação ajustada com a NBR 6118:2014 e Dal Molin e Monteiro (1996).....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da resistência à compressão para diversos tamanhos e formas de corpos de prova.....	23
Tabela 2 - Módulo de elasticidade para concretos produzidos com agregados de diferentes naturezas.....	29
Tabela 3 - Fator α_E em relação ao tipo de agregado graúdo do concreto.....	33
Tabela 4 - Relação entre f_c e E_{ci} para diversas referências.....	35
Tabela 5 - Concretos com $D_{máx}$ de 19,0 mm.....	36
Tabela 6 - Concretos com $D_{máx}$ de 12,5 mm.....	37
Tabela 7 - Características químicas do cimento.....	37
Tabela 8 - Características físicas e mecânicas do cimento.....	38
Tabela 9 - Características químicas da cinza volante.....	38
Tabela 10 - Características físicas da cinza volante.....	39
Tabela 11 - Características físicas dos agregados miúdos.....	39
Tabela 12 - Características físicas dos agregados graúdos.....	41
Tabela 13 - Traços dos concretos do grupo A.....	42
Tabela 14 - Traços dos concretos do grupo B.....	43
Tabela 15 - Traços dos concretos do grupo C.....	44
Tabela 16 - Traços dos concretos do grupo D.....	45
Tabela 17 - Resultados de f_{cmj} e f_{cmj}/f_{cm} de todos os concretos.....	48
Tabela 18 - Valores de E_{cij} e E_{cij}/E_{ci} de todos os concretos.....	53
Tabela 19 - Equações ajustadas aos dados experimentais.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
D _{máx}	Dimensão máxima característica do agregado graúdo
E _c	Módulo de elasticidade do concreto
E _{ci}	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto aos 28 dias
E _{cij}	Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto à j dias
E _{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
f _c	Resistência à compressão do concreto
f _{ck}	Resistência à compressão característica do concreto aos 28 dias
f _{ckj}	Resistência à compressão característica do concreto à j dias
f _{cm}	Resistência de dosagem do concreto aos 28 dias
f _{cmj}	Resistência de dosagem do concreto à j dias
FIB	Fédération Internationale du Béton
g	Grama
GPa	Gigapascal
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
LATEC	Laboratório de Tecnologias de Construção
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral	13
1.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 Justificativa.....	14
1.4 Delimitações da pesquisa.....	14
1.5 Estrutura do trabalho	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Resistência à compressão do concreto (f_c).....	16
2.1.1 Conceito de resistência à compressão	16
2.1.2 Determinação da resistência à compressão.....	16
2.1.3 Fatores que influenciam a resistência à compressão.....	17
2.1.3.1 Relação a/c.....	17
2.1.3.2 Porosidade.....	19
2.1.3.3 Agregados graúdos.....	20
2.1.3.4 Temperatura.....	20
2.1.3.5 Cura	21
2.1.3.6 Tamanho e forma dos corpos de prova	22
2.2 Módulo de elasticidade do concreto (E_c)	24
2.2.1 Conceito de módulo de elasticidade	24
2.2.2 Determinação do módulo de elasticidade.....	25
2.2.3 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade.....	27
2.2.3.1 Agregados.....	28
2.2.3.2 Matriz da pasta de cimento.....	30
2.2.3.3 Zona de transição da interface da pasta de agregado	31

2.2.3.4 Parâmetros de ensaio	31
2.3 Relação entre f_c e E_c	33
3 METODOLOGIA	36
3.1 Materiais e dosagens	37
3.2 Métodos de ensaios	46
4 RESULTADOS.....	47
4.1 Resistência à compressão	47
4.2 Módulo de elasticidade.....	52
4.3 Relação f_{cmj}/f_{cm} e E_{cij}/E_{ci}	58
4.4 Relação entre E_{cij} e f_{cmj}	59
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é o mais importante material de construção civil atualmente, e pode ser considerado como uma das mais expressivas descobertas da história do desenvolvimento da humanidade. Tamanha é sua posição de destaque como material de construção civil mais utilizado no Brasil e em outros países, que é possível afirmar que o concreto é o material mais consumido pelo homem depois da água (HELENE; ANDRADE, 2010).

A partir de sua descoberta no final do século XIX e seu uso intensivo após o século XX, a forma de projetar e construir estruturas foi revolucionada ao passo que o uso do concreto armado foi desenvolvido na Alemanha e o concreto de cimento Portland torna-se mais conhecido e mais confiável (HELENE; ANDRADE, 2010).

O concreto tem sido amplamente utilizado em várias estruturas, desde edificações, pontes, barragens, até ferrovias de alta velocidade. Além disso, ainda é muito utilizado na construção de pistas de aeroportos, túneis, autoestradas, galerias e plataformas de petróleo (LI, 2011).

Em estruturas de concreto armado, o concreto suporta principalmente as forças de compressão e cisalhamento, enquanto que o aço é resistente à tração. Além disso, o concreto proporciona rigidez à estrutura, tornando-a estável (LI, 2011).

Conforme Mehta e Monteiro (2014), a resistência à compressão é uma propriedade geralmente especificada em projetos e controle de qualidade do concreto, porque é um ensaio relativamente fácil. Ainda, diversas propriedades do

concreto, como módulo de elasticidade, impermeabilidade e durabilidade podem ser deduzidas a partir da resistência à compressão, pois se acredita que essas propriedades estejam ligadas à resistência.

Durante várias décadas, os projetistas de estruturas de concreto armado utilizaram a resistência à compressão do concreto na faixa de 15 a 25 MPa, e mantiveram esse nível mesmo após uma grande evolução da produção de cimento, quando as resistências à compressão passaram a atingir valores da ordem de 40 MPa aos 28 dias (DJANIKIAN FILHO, 2010).

Com a evolução da tecnologia do concreto paralelamente à otimização dos processos de dosagem, resistências à compressão mais altas passaram a ser utilizadas pelos projetistas, porém, a exigência apenas de resistência à compressão levou a deformações em longo prazo. A partir de então, além da resistência à compressão do concreto, passou a ser exigido também o módulo de elasticidade no instante da desforma, o que tem levado a valores de resistência à compressão ainda maiores (DJANIKIAN FILHO, 2010).

A determinação do módulo de elasticidade do concreto é, de modo geral, mais complexa em relação à determinação da sua resistência à compressão, por isso, a grande maioria dos projetos estruturais utiliza um valor para o módulo de elasticidade obtido através de equações empíricas apresentadas por diversas normas, tomando como variável a resistência à compressão (MELO NETO; HELENE, 2002). Entretanto, essas equações acabam tornando-se genéricas demais frente à grande diversidade de materiais que podem ser constituintes do concreto, por isso, segundo Shehata (2005), é necessária a adequação de equações específicas para os concretos utilizados em cada região, para que se possam estimar os valores do módulo de elasticidade de forma mais próxima da realidade.

1.1 Objetivo geral

Avaliar a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade tangente inicial de concretos dosados em uma central localizada na cidade de Lajeado/RS.

1.2 Objetivos específicos

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Propor uma equação para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial através da resistência à compressão do concreto;
- Adequar uma relação para estimar a resistência à compressão do concreto em uma certa idade a partir da resistência aos 28 dias;
- Investigar a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade;
- Analisar a influência do abatimento do concreto no módulo de elasticidade.

1.3 Justificativa

Cada vez mais as estruturas de concreto armado estão se tornando mais esbeltas e a sua capacidade de deformação passando a ser cada vez mais um elemento relevante e preponderante quando da utilização, desempenho e manutenção das estruturas.

Embora o módulo de elasticidade possa ser obtido simplesmente a partir de valores da resistência à compressão, cada equação, tanto de normas nacionais como internacionais, apresenta resultados que divergem. Isso porque o módulo de elasticidade é influenciado por diversos fatores, sendo a resistência à compressão somente um deles.

Portanto, é proposta neste trabalho uma equação realista para a estimativa do módulo de elasticidade do concreto através da resistência à compressão, que poderá ser empregada em projetos que utilizem os concretos dosados com as mesmas características da central dosadora de concreto em estudo, já que considera as particularidades dos materiais (britas e areia, principalmente) mais encontrados nesta região.

1.4 Delimitações da pesquisa

No desenvolvimento deste trabalho optou-se por utilizar materiais provenientes de uma central dosadora de concreto da cidade de Lajeado que atende boa parte das obras do entorno. Os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade serão realizados conforme as NBRs 5739:2007 e 8522:2008, respectivamente, e serão propostas equações específicas para os concretos ensaiados.

1.5 Estrutura do trabalho

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta uma breve introdução sobre o concreto como material estrutural e a utilização da resistência à compressão e do módulo de elasticidade em projetos de estruturas de concreto armado, definindo os objetivos desta pesquisa, delimitando o seu tema, além de justificar a sua relevância.

No segundo capítulo, são evidenciados os aportes teóricos inerentes ao tema desta pesquisa, em que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto são abordados, sendo explicados seus conceitos, formas de determinação em laboratório, e os principais fatores que os influenciam e, ainda, as relações entre essas duas propriedades.

O terceiro capítulo é composto pela metodologia empregada e materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

O quarto capítulo apresenta os resultados do programa experimental bem como análises e discussões dos mesmos. Por fim, o quinto capítulo contém as conclusões obtidas através dos dados analisados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resistência à compressão do concreto (f_c)

2.1.1 Conceito de resistência à compressão

No concreto, a resistência está relacionada com tensão máxima necessária para causar a ruptura. Mesmo sem sinais visíveis de fratura externa, o corpo de prova é considerado rompido quando não suportar uma carga maior, isso devido ao estado avançado de fissuração interna atingido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.2 Determinação da resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto é determinada conforme a NBR 5739:2007, que prescreve um método de ensaio para corpos de prova cilíndricos de concreto. Basicamente, o ensaio consiste em posicionar o corpo de prova em uma prensa que aplicará um carregamento a uma velocidade constante de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s até que haja uma queda de força indicando sua ruptura.

A resistência à compressão é calculada através da seguinte equação:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (1)$$

Em que, f_c é a resistência à compressão (MPa), F é a força máxima alcançada (N) e D é o diâmetro do corpo de prova (mm).

2.1.3 Fatores que influenciam a resistência à compressão

2.1.3.1 Relação a/c

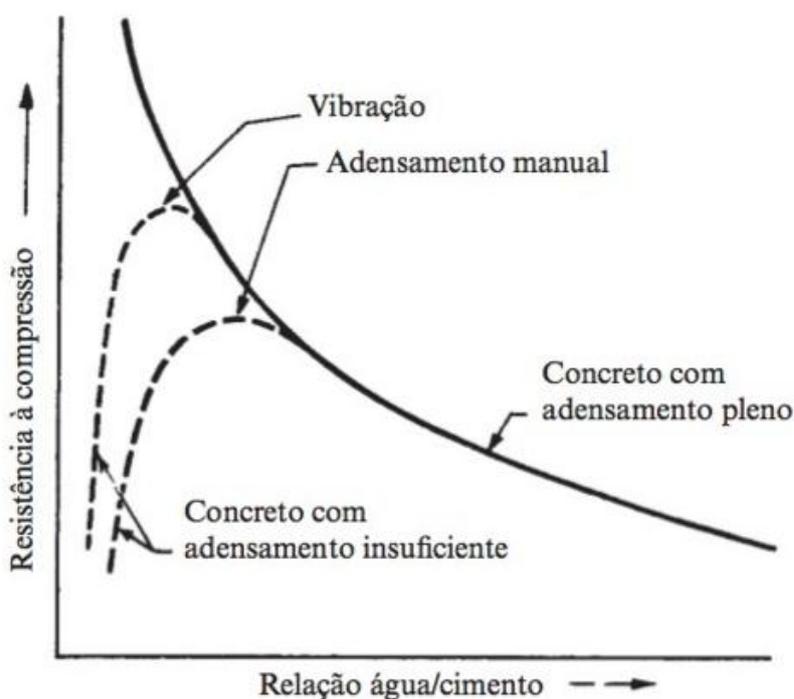
A relação água/cimento, popularmente conhecida como Lei de Abrams, é representada pela equação:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (2)$$

Onde, a/c é a relação água/cimento da dosagem do concreto, k_1 e k_2 são constantes empíricas e f_c é a resistência à compressão do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Segundo Neville (2016), de modo geral, quando o concreto está plenamente adensado, a sua resistência é considerada inversamente proporcional à relação água/cimento. Contudo, analisando a Figura 1, observa-se que a relação prática entre a resistência e a relação a/c é limitada, pois a curva deixa de ser obedecida quando não é mais possível o adensamento pleno em relações a/c muito baixas.

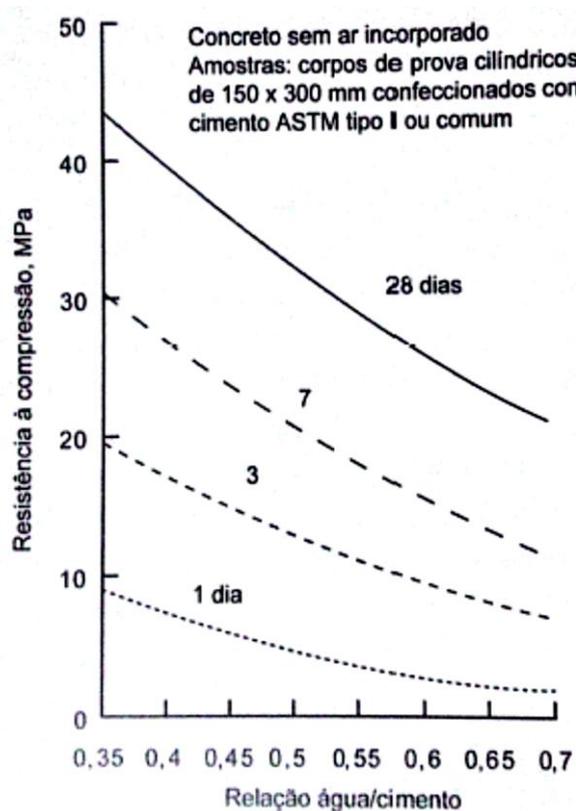
Figura 1 - Relação entre a resistência à compressão e a relação a/c do concreto



Para Mehta e Monteiro (2014), a relação entre a relação a/c e a resistência do concreto pode ser facilmente explicada como consequência do enfraquecimento progressivo da matriz causado pelo aumento da porosidade com o aumento da relação a/c.

Em concretos de densidade normal de baixa e média resistência, a porosidade da zona de transição na interface e da matriz é determinante na resistência, o que mantém a relação direta entre a/c e a resistência do concreto. Porém, para concretos de alta resistência a resistência à compressão pode ser aumentada de forma desproporcionalmente elevada com reduções muito pequenas na relação a/c, conforme pode ser observado nas Figuras 1 e 2 (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2 - Influência da relação a/c e idade de cura na resistência do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p.56).

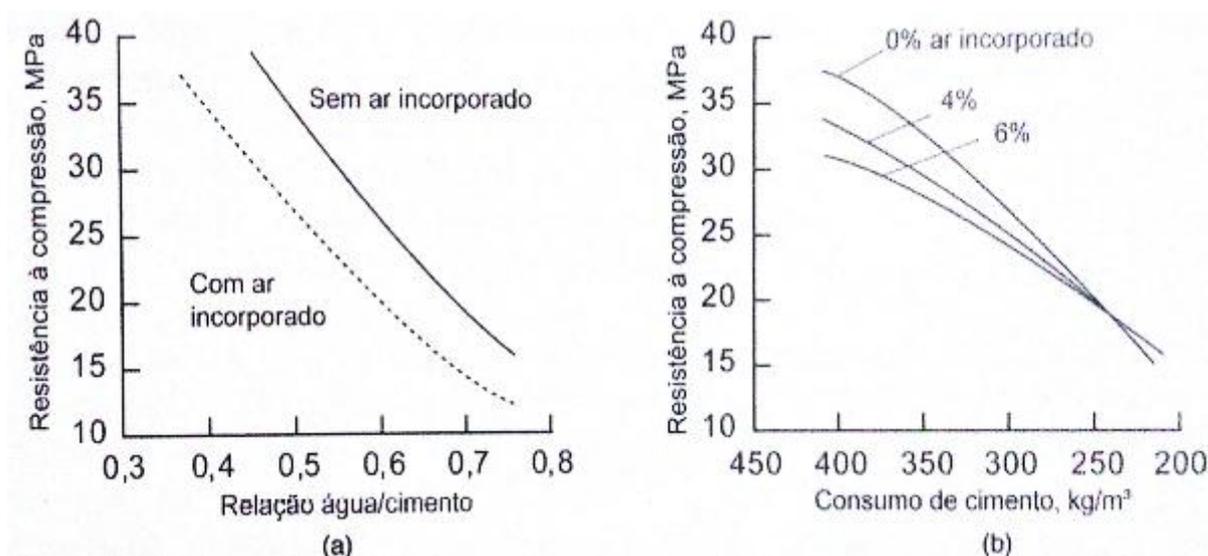
Embora alguns pesquisadores afirmem que a relação a/c não é suficientemente fundamental, na prática, ela é o fator mais correlacionado à resistência do concreto (NEVILLE, 2016).

2.1.3.2 Porosidade

Embora o concreto seja um material complexo demais para previsão de resistência por relação exata entre resistência e porosidade, essa relação deve ser respeitada, pois a porosidade no concreto torna-se um real limitador da resistência, uma vez que a resistência do concreto é influenciada principalmente pelo volume de vazios contido nele (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016).

Para Mehta e Monteiro (2014), ainda que a relação a/c , na maioria dos casos, determine a porosidade da matriz da pasta de cimento hidratada, quando vazios de ar são incorporados no concreto, ou pelo adensamento inadequado ou pelo uso de aditivos químicos, a porosidade também aumenta e a resistência do concreto diminui. Isso pode estar relacionado ao nível geral da resistência do concreto, visto que o nível de perda não depende somente da relação a/c , mas também do consumo de cimento (FIGURA 3).

Figura 3 - Influência da relação a/c , ar incorporado e consumo de cimento na resistência do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p.57).

2.1.3.3 Agregados graúdos

Geralmente, na tecnologia do concreto, a resistência do agregado não costuma ser considerada, pois esse é muito mais resistente do que a matriz da pasta de cimento e a zona de transição na interface entre pasta de agregado, fazendo com que a ruptura seja determinada por essas duas fases. Todavia, outras características do agregado afetam a resistência do concreto, como dimensão, forma, textura e granulometria (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme Li (2011), a utilização de agregados com granulometria bem definida causa uma diminuição dos vazios no concreto, o que gera um aumento na resistência à compressão. A forma e a textura do agregado também podem influenciar na resistência à compressão do concreto. Dada uma relação a/c constante e o mesmo consumo de cimento, agregados de forma angular e superfície áspera resultam em maior resistência à compressão do que agregados de forma esférica e superfície lisa.

Para Neville (2016), a influência na resistência do concreto devido ao agregado graúdo depende da relação a/c e é variável. Nota-se que com o aumento da relação a/c , a influência do agregado graúdo na resistência diminui, possivelmente pela resistência da matriz da pasta de cimento hidratada tornar-se primordial.

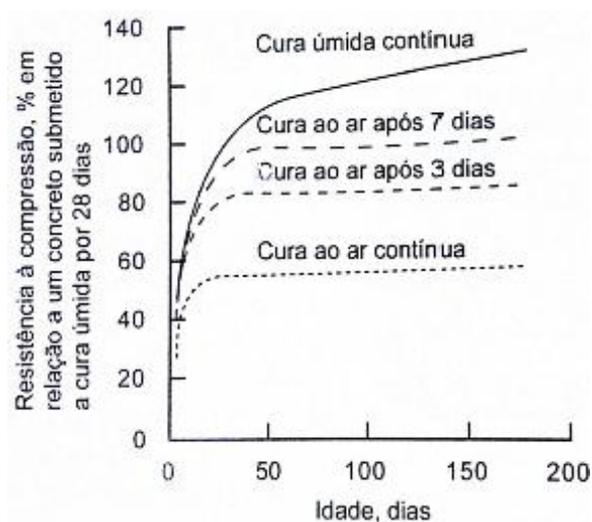
2.1.3.4 Temperatura

Conforme Newman e Choo (2003), baixas temperaturas diminuem o desenvolvimento da resistência inicial do concreto, enquanto temperaturas elevadas aumentam a resistência do concreto em idades iniciais. A temperatura no momento do lançamento do concreto tem efeito na sua resistência aos 28 dias. Pouco tempo em elevada temperatura é suficiente para prejudicar a resistência do concreto aos 28 dias, já o efeito de baixa temperatura é menos expressivo.

2.1.3.5 Cura

A cura do concreto é a combinação de tempo, temperatura e umidade do concreto após o seu lançamento, realizada para promover a hidratação do cimento. A Figura 4 mostra que, após certo tempo, a resistência do concreto não aumenta com a idade da cura sem que seja cura úmida.

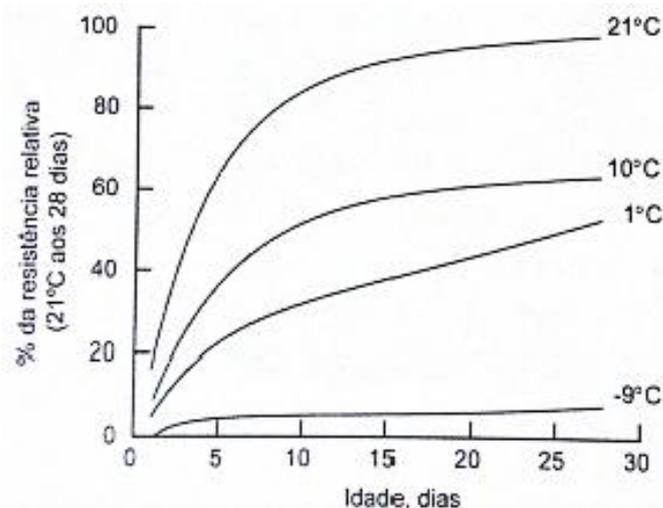
Figura 4 - Influência das condições de cura sobre a resistência do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 64).

A temperatura de cura do concreto tem grande influência na taxa de desenvolvimento da resistência e resistência final do concreto por controlar o grau de hidratação do cimento. A Figura 5 mostra o efeito de diferentes temperaturas de cura na resistência do concreto. De modo geral, quanto menor a temperatura de cura, menor será a resistência do concreto.

Figura 5 - Influência das temperaturas de moldagem e cura na resistência do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 66).

2.1.3.6 Tamanho e forma dos corpos de prova

O tamanho e forma dos corpos de prova tem significativa influência nos resultados dos ensaios de resistência à compressão e pode se tornar um problema para análise comparativa visto que diferentes países utilizam diferentes formas e tamanhos de corpos de prova. No Brasil, são utilizados, corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, nos Estados Unidos o corpo de prova padrão é um cilindro de 150 mm x 300 mm, já a norma britânica determina que podem ser utilizados cubos, cilindros ou prismas de diferentes dimensões (BS EN 12390-1, 2000; RAO et. al., 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Em estudo conduzido por Rao et. al. (2011), é possível observar as diferenças dos resultados da resistência à compressão de um mesmo concreto do qual foram moldados corpos de prova de diversos tamanhos e formas (TABELA 1).

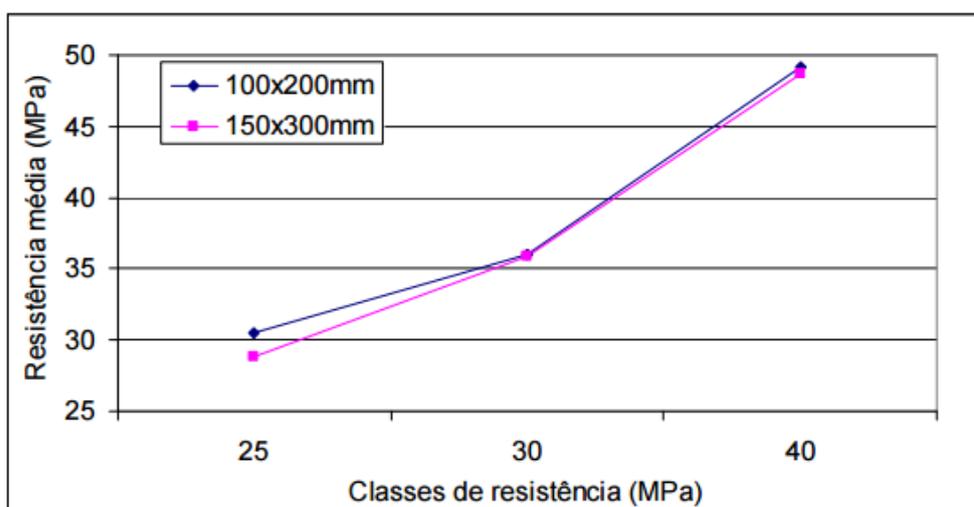
Tabela 1 - Resultados da resistência à compressão para diversos tamanhos e formas de corpos de prova

ID CP	TIPO DE CP	TAMANHO DO CP (mm)	f_{c7} (MPa)	f_{c28} (MPa)
1	Cubo	100x100x100	18,2	30,3
2	Cubo	150x150x150	20,0	33,4
3	Cilindro	100x100	21,1	34,2
4	Cilindro	100x200	15,7	25,6
5	Cilindro	100x300	15,2	24,6
6	Cilindro	100x400	14,8	22,5
7	Cilindro	150x150	18,8	29,6
8	Cilindro	150x300	15,3	25,5
9	Cilindro	150x450	14,2	23,9
10	Cilindro	150x600	12,8	20,6
11	Prisma	100x100x200	16,3	28,2
12	Prisma	100x100x300	15,0	27,1
13	Prisma	100x100x400	14,2	25,8
14	Prisma	100x100x500	12,8	23,2
15	Prisma	150x150x300	18,1	31,8
16	Prisma	150x150x450	16,2	29,8
17	Prisma	150x150x600	14,8	28,0

Fonte: Adaptado pelo autor de Rao et. al. (2011).

Um dado importante que também pode ser observado na Tabela 1 é que os corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm, os quais são padronizados no Brasil, não apresentaram diferença significativa de resultados, o que vai ao encontro da pesquisa de Martins (2008), que comparou os resultados de resistência à compressão obtidos em concretos de várias classes de resistência em corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm (FIGURA 6).

Figura 6 - Resistência média à compressão me função da classe de resistência do concreto



Fonte: Martins (2008, p. 85).

2.2 Módulo de elasticidade do concreto (E_c)

2.2.1 Conceito de módulo de elasticidade

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade do concreto pode ser descrito como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado, e é dado pela declividade da curva tensão-deformação sob carregamento uniaxial.

Devido à não linearidade da curva tensão-deformação do concreto, são definidos pelo menos três tipos de módulos de elasticidade, resumidos por Helene (1998) e Mehta e Monteiro (2014):

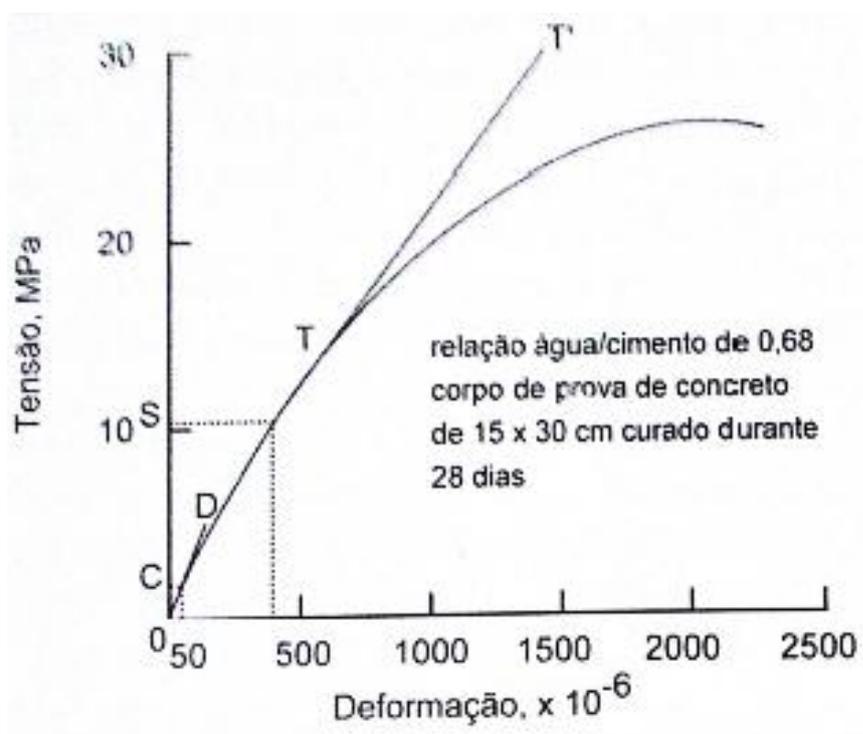
- Módulo de elasticidade tangente inicial: é o módulo de deformação, estático e instantâneo para uma linha tangente à curva tensão-deformação traçada a partir da origem. Corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre $0,5 \text{ MPa}$ e $0,3f_c$ e ao módulo de elasticidade secante a $0,3 f_c$.
- Módulo de elasticidade secante: é o módulo de deformação estático e instantâneo, dado pela declividade de uma linha traçada da origem até qualquer porcentagem de f_c . Geralmente recomenda-se trabalhar com o

módulo de elasticidade secante a $0,4f_c$, que equivale ao módulo cordal entre 0,5 MPa e $0,4f_c$.

- c) Módulo de elasticidade cordal: é o módulo de deformação, estático e instantâneo, dado pela inclinação de uma linha traçada em qualquer intervalo da curva tensão-deformação.

A Figura 7 apresenta os diferentes tipos de módulos de elasticidade, onde a declividade da linha OD representa o módulo de elasticidade tangente inicial, a declividade da linha SO corresponde ao módulo de elasticidade secante e a declividade da linha SC, ao módulo de elasticidade cordal.

Figura 7 - Diferentes tipos de módulo de elasticidade



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 92).

2.2.2 Determinação do módulo de elasticidade

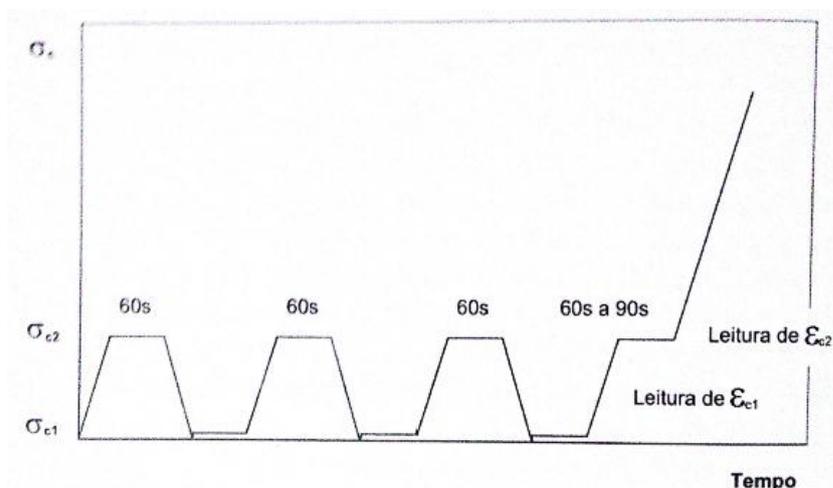
O módulo de elasticidade tangente inicial do concreto (E_{ci}) é determinado pelo ensaio prescrito pela NBR 8522:2008, sendo este o módulo a ser determinado por ensaio, conforme estabelecido pela NBR 6118:2014.

Primeiramente, determina-se a resistência à compressão do concreto (f_c) em dois corpos-de-prova da mesma betonada, preparados e curados da mesma forma que os corpos-de-prova a serem utilizados para a determinação do módulo, devendo ser ensaiados à compressão conforme a NBR 5739:2007. Posteriormente, define-se a metodologia a ser utilizada, sendo elas:

- a) Metodologia A – Tensão σ_a fixa: carrega-se o corpo de prova até $0,3f_c$ mantendo-o nesse nível por 60 segundos e então alivia-se a tensão até uma força próxima de zero. Em seguida, carrega-se o corpo de prova até à tensão de 0,5 MPa mantendo-o nesse nível por 60 segundos e novamente carrega-se o corpo de prova até $0,3f_c$ mantendo-o nesse nível por 60 segundos e então alivia-se a tensão até uma força próxima de zero, realiza-se essa etapa por mais uma vez. Após o último alívio de tensão, carrega-se o corpo de prova até 0,5 MPa por 60 segundos e então são tomadas as deformações específicas sob tensão básica, em seguida, carrega-se o corpo de prova até $0,3f_c$ por 60 segundos e registram-se as deformações sob a tensão maior;
- b) Metodologia B – Deformação específica ϵ_a fixa: carrega-se o corpo de prova até $0,3f_c$ mantendo-o nesse nível por 60 segundos e então alivia-se a tensão até uma força próxima de zero. Em seguida, carrega-se o corpo de prova até à deformação específica de 5×10^{-6} mantendo-o nesse nível por 60 segundos e novamente carrega-se o corpo de prova até $0,3f_c$ mantendo-o nesse nível por 60 segundos e então alivia-se a tensão até uma força próxima de zero, realiza-se essa etapa por mais uma vez. Após o último alívio de tensão, carrega-se o corpo de prova até à deformação específica de 5×10^{-6} por 60 segundos e então são tomadas as deformações específicas sob tensão básica, em seguida, carrega-se o corpo de prova até $0,3f_c$ por 60 segundos e registram-se as deformações sob a tensão maior.

A Figura 8 apresenta o esquema de carregamento de descarregamento para as duas metodologias segundo a NBR 8522:2008.

Figura 8 - Ciclos de carregamento e descarregamento para determinação de E_{ci}



Fonte: Shehata (2011, p. 662).

O módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) deve ser calculado conforme a Equação 3 para a metodologia A ou Equação 4 para a metodologia B.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (3)$$

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} 10^{-3} \quad (4)$$

Onde, σ_a é a tensão correspondente à deformação específica 50×10^{-6} (MPa), σ_b é a tensão maior que corresponde à $0,3f_c$ (MPa), ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova sob tensão de 0,5 MPa e ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova sob tensão de $0,3f_c$.

2.2.3 Fatores que influenciam o módulo de elasticidade

Sendo o concreto um material heterogêneo e composto por mais de uma fase, o módulo de elasticidade do concreto é determinado principalmente pela fração volumétrica, densidade e módulo dos agregados e da matriz da pasta de cimento, e ainda pelas características da zona de transição da interface pasta e agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Além disso, o módulo de elasticidade do concreto também é influenciado por parâmetros de ensaio, como a umidade (NEVILLE, 2013; MEHTA; MONTEIRO,

2014) e dimensões (MARTINS, 2008) dos corpos de prova e o tipo de medidor de deformação (ARAÚJO et. al., 2012).

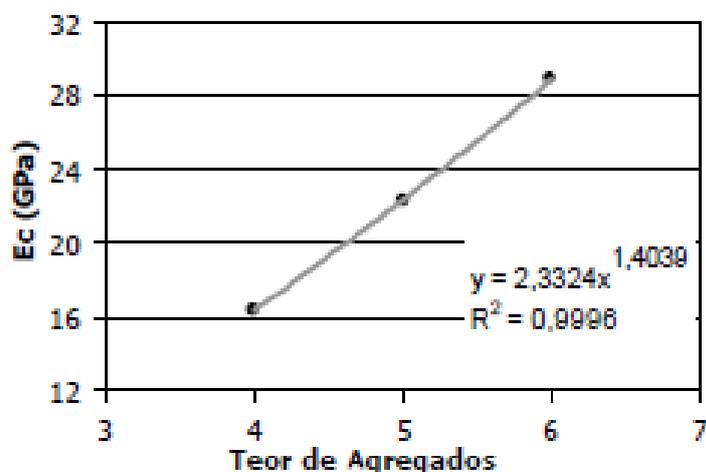
2.2.3.1 Agregados

Apesar das propriedades dos agregados não influenciarem significativamente a resistência à compressão, no módulo de elasticidade, os agregados têm significativa influência que advém do módulo de elasticidade do próprio agregado e de sua proporção volumétrica no concreto (NEVILLE, 2013).

Agregados densos têm um alto módulo de elasticidade e, para agregados com módulo maior do que a pasta de cimento (maioria dos casos), quanto maior a quantidade em uma mistura de concreto, maior será o módulo de elasticidade do concreto (NEVILLE, 2013; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Isso fica claro nos estudos de Melo Neto e Helene (2002) que acharam que, para uma relação a/c constante, um aumento no volume de agregados resultou em um aumento do módulo de elasticidade do concreto (FIGURA 9), e de Alhadad (2008) que dosou um mesmo traço de concreto variando apenas a natureza do agregado e encontrou diferentes valores de módulo de elasticidade, conforme Tabela 3.

Figura 9 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados



Fonte: Neto e Helene (2002, p. 12).

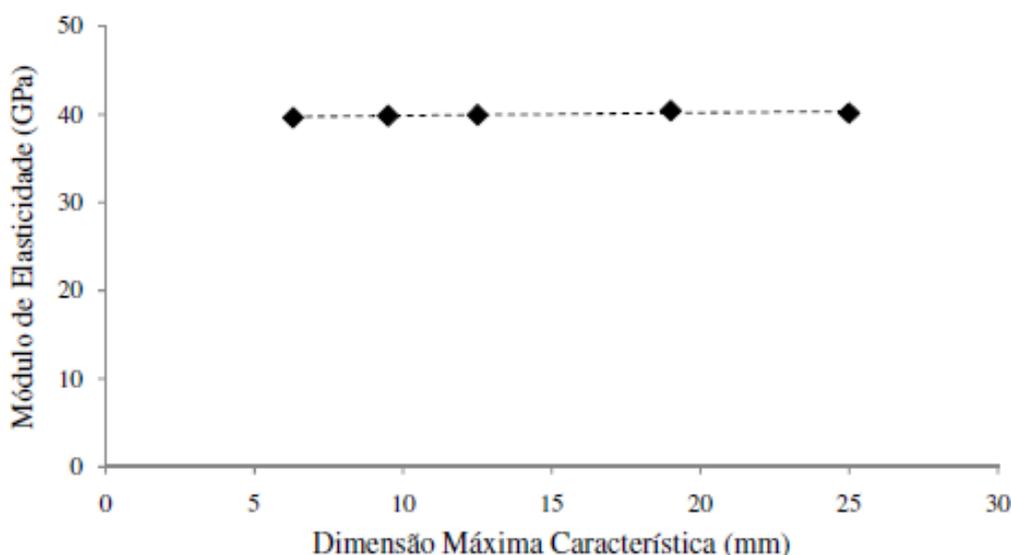
Tabela 2 - Módulo de elasticidade para concretos produzidos com agregados de diferentes naturezas

NATUREZA DO AGREGADO	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)				
	3 DIAS	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS
Calcário	20,2	28,4	32,5	32,7	34,4
Gnaisse	17,5	28,7	32,1	33,6	35,5
Dolomita	26,3	35	38,6	39,5	39,9
Basalto	22,9	33,5	36,7	39,5	39,9

Fonte: Adaptado pelo autor de Alhadas (2008).

A dimensão máxima característica do agregado graúdo também pode influenciar no módulo de elasticidade do concreto, porém não há consenso na literatura. Barbosa et. al. (1999) encontraram valores de módulo de elasticidade maiores para concretos produzidos com agregados graúdos de basalto com $D_{m\acute{a}x} = 19,5$ mm do que os com $D_{m\acute{a}x} = 9,5$ mm. No entanto, Rohden (2011) relata que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não influenciou significativamente no módulo de elasticidade de um mesmo concreto dosado com diferentes tamanhos de agregados (FIGURA 10).

Figura 10 - Efeito da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade médio do concreto



Fonte: Rohden (2011).

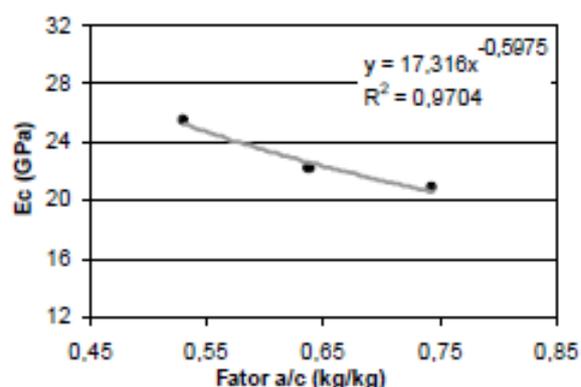
Rohden (2011) explica que esses resultados opostos no módulo de elasticidade podem estar ligados à sobreposição de dois efeitos. Para concretos produzidos com baixos consumos de água, a diminuição de $D_{\text{máx}}$ causa um aumento da resistência à compressão e, assim sendo, do módulo de elasticidade. Entretanto, o empacotamento granular melhora com o aumento de $D_{\text{máx}}$ possibilitando dosagens de concretos com teores mais elevados de agregados graúdos, e assim, aumentando o módulo de elasticidade.

2.2.3.2 Matriz da pasta de cimento

A porosidade da matriz da pasta de cimento é o que determina o seu módulo de elasticidade, portanto, fatores que controlam a porosidade da pasta de cimento, como a relação a/c e grau de hidratação do cimento afetam diretamente o módulo de elasticidade do concreto (Mehta e Monteiro, 2014).

Melo Neto e Helene (2002) relatam que, mantendo-se o abatimento constante, uma diminuição da relação a/c causa um aumento do módulo de elasticidade do concreto, conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o fator a/c



Fonte: Neto e Helene (2002, p. 10).

Como visto anteriormente, a cura do concreto é responsável por promover a hidratação do cimento e, além de aumentar a resistência a compressão, aumenta também o módulo de elasticidade, porém, segundo Neville (2013) e Mehta e Monteiro (2014), o valor do módulo cresce mais rápido que o valor da resistência à compressão.

2.2.3.3 Zona de transição da interface da pasta de agregado

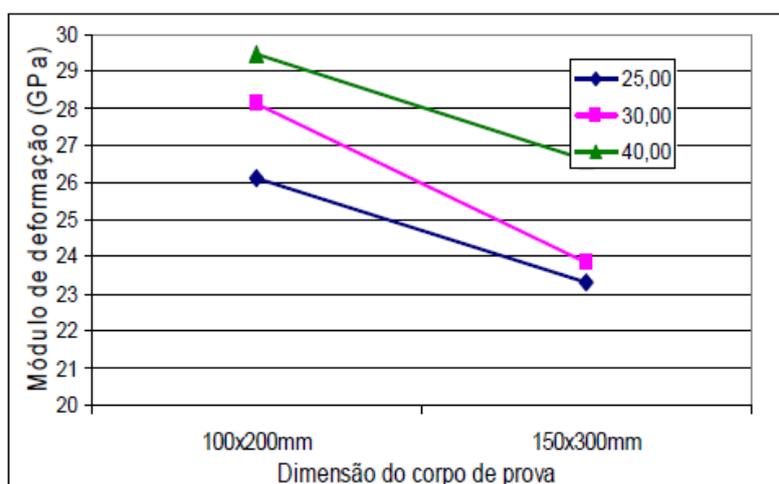
Mehta e Monteiro (2014) explicam que o fato de o módulo de elasticidade apresentar uma taxa de crescimento mais alta do que a resistência à compressão possa decorrer da diminuição da porosidade da zona de transição através da lenta interação química entre a pasta de cimento e o agregado e, ainda, de modo geral, vazios capilares, microfissuras e cristais orientados de hidróxido de cálcio são mais comuns na zona de transição do que na pasta de cimento, contribuindo de forma importante no resultado do módulo de elasticidade do concreto.

2.2.3.4 Parâmetros de ensaio

Conforme constatado por Neville (2013) e Mehta e Monteiro (2014), corpos de prova ensaiados úmidos, apresentam um aumento de cerca de 15% no valor do módulo de elasticidade em comparação a um corpo de prova correspondente ao mesmo concreto ensaiado na condição seco.

Martins (2008) avaliou a influência do tamanho do corpo de prova no módulo de elasticidade do concreto, moldando corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm para diferentes classes de resistência de concretos e constatou que todos os corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm apresentaram valores maiores de módulo de elasticidade (FIGURA 12).

Figura 12 - Módulo de deformação médio em função do tamanho do corpo de prova

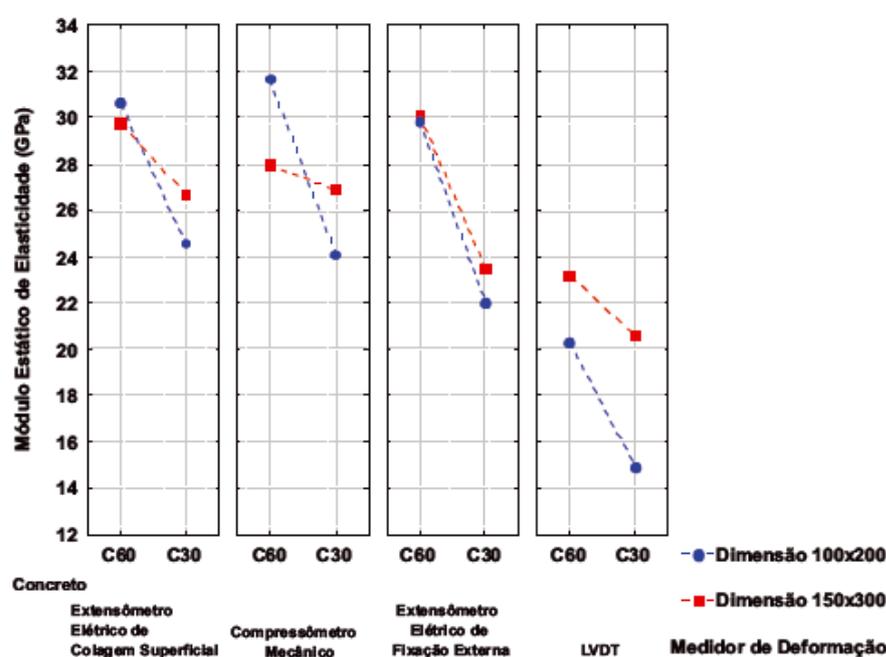


Fonte: Martins (2008, p. 90).

Outro fator que influencia na determinação do módulo de elasticidade é o tipo de medidor de deformação. Araújo et. al. (2012) testaram quatro tipos diferentes de medidores de deformação: compressômetro mecânico (CM), extensômetro elétrico de colagem superficial (EECS), extensômetro elétrico de fixação externa (EEFE) e transdutor diferencial de variação linear (LVDT) em corpos de prova de dimensões 100 mm x 200 mm e 150 mm x 300 mm para concretos de média resistência (C30) e elevada resistência (C60).

Os pesquisadores encontraram, ao contrário de Martins (2008), que a maioria dos corpos de prova de dimensões 150 mm x 300 mm resultaram em maiores valores de módulo de elasticidade. Para os tipos de medidores, concluíram que: os medidores EECS e CM apresentam resultados semelhantes e maiores do que os outros dois tipos; o LVDT apresentou a maior variação dos resultados, portanto, o menos preciso; os dois medidores elétricos foram os mais precisos com destaque para o EEFE que foi considerado o mais prático e fácil de ser manuseado, minimizando a possibilidade de erros por influência externa (FIGURA 13). Assim, mesmo seguindo os critérios propostos pela NBR 8522:2008, são significativas as variações nos resultados dos ensaios.

Figura 13 - Módulo estático de elasticidade, por dimensão do corpo de prova, tipo de concreto e medidor de deformação



Fonte: Araújo et. al. (2012, p. 572).

2.3 Relação entre f_c e E_c

Existem vários modelos de previsão para estimar o módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão do concreto, sendo que algumas expressões ainda levam em conta o tipo do agregado. De modo geral, essas expressões são apresentadas conforme a Equação 5:

$$E_c = k_1 f_c^{k_2} \quad (5)$$

Onde, k_1 é dado pelo produto de parâmetros relativos às variáveis do concreto considerados nas expressões e k_2 varia entre 0,3 e 0,5 (SHEHATA, 2011).

Segundo a NBR 6118:2014, o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto pode ser estimado, aos 28 dias de idade, utilizando a Equação 6 para f_{ck} entre 20 MPa e 50 MPa e a Equação 7 para f_{ck} de 55 MPa até 90 MPa.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (6)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (7)$$

Em que E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente inicial (MPa), f_{ck} é a resistência à compressão característica do concreto (MPa) e α_E é um fator de correção de acordo com o tipo de agregado graúdo do concreto (TABELA 3).

Tabela 3 - Fator α_E em relação ao tipo de agregado graúdo do concreto

TIPO DE AGREGADO	α_E
Basalto e diabásio	1,2
Granito e gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Fonte: Adaptado pelo autor de NBR 6118 (2014).

A norma americana ACI 318 (2014) permite calcular o módulo de elasticidade secante (E_{cs}) a $0,45f_c$ pela seguinte expressão (Eq. 8):

$$E_{cs} = 4700\sqrt{f_{ck}} \quad (8)$$

Segundo Neto e Helene (2002), o módulo tangente inicial é em torno de 1,1 vezes maior que o módulo secante a 45% de f_c , portanto, é possível ajustar a Equação 7 para o módulo tangente inicial (Eq. 9).

$$E_{ci} = 5170\sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

A norma FIB MODEL CODE (2010) diz que o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto pode ser estimado conforme a Equação 10 levando em consideração o mesmo fator α_E da Tabela 3.

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}+8}{10}\right)^{1/3} \quad (10)$$

A expressão apresentada pela norma EUROCODE 2 (2004) também leva em consideração a natureza do agregado e o módulo de elasticidade tangente inicial pode ser calculado conforme a Equação 11:

$$E_{ci} = 23,1 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}+8}{10}\right)^{0,3} \quad (11)$$

Além das expressões publicadas por normas, diversos pesquisadores propuseram expressões ajustadas a partir de ensaios realizados com materiais e condições específicas. Nunes (2005) testou diversos concretos com agregados graúdos de gnaiss e sienito e encontrou uma equação que melhor representa a estimativa do módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão (Eq. 12).

$$E_{ci} = 5,0f_{ck}^{0,5} \pm 3,42 \quad (12)$$

Em que E_{ci} é dado em GPa e f_{ck} em MPa.

Dal Molin e Monteiro (1996) encontraram a Equação 13 para estimar o módulo de elasticidade para concretos produzidos com agregado graúdo de origem basáltica e resistência à compressão entre 20 MPa a 90 MPa.

$$E_{ci} = 9570f_{ck}^{0,31} \quad (13)$$

Onde E_{ci} e f_{ck} são dados em MPa.

Para agregados graúdos de origem granítica, Martins (2008) encontrou a Equação 14 para estimar o módulo de elasticidade.

$$E_{ci} = 10,467 f_{ck}^{0,2693} \quad (14)$$

Onde E_{ci} é dado em GPa e f_{ck} em MPa.

A Tabela 4 reúne todas as equações anteriormente apresentadas para estimar o módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão do concreto.

Tabela 4 - Relação entre f_c e E_{ci} para diversas referências

REFERÊNCIA	EQUAÇÃO	OBSERVAÇÕES
NBR 6118 (2014)	$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}$	20 MPa ≤ f_{ck} ≤ 50 MPa
	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$	55 MPa ≤ f_{ck} ≤ 90 MPa
ACI 318 (2014)	$E_{ci} = 5170 \sqrt{f_{ck}}$	-
FIB MODEL CODE (2010)	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$	12 MPa ≤ f_{ck} ≤ 80 MPa
EUROCODE 2 (2004)	$E_{ci} = 23,1 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{0,3}$	12 MPa ≤ f_{ck} ≤ 90 MPa
Nunes (2005)	$E_{ci} = 5,0 f_{ck}^{0,5} \pm 3,42$	Gnaisse e sienito
Dal Molin e Monteiro (1996)	$E_{ci} = 9570 f_{ck}^{0,31}$	20 MPa ≤ f_{ck} ≤ 90 MPa; Basalto
Martins (2008)	$E_{ci} = 10,467 f_{ck}^{0,2693}$	Granito

Fonte: Do autor.

3 METODOLOGIA

Foi realizado um estudo experimental com o objetivo de investigar a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade em diferentes idades dos concretos produzidos em uma central dosadora de concreto de Lajeado/RS, moldados em laboratório.

Foram moldados corpos de prova de concretos preparados em laboratório com os materiais utilizados na central dosadora, abrangendo uma faixa ampla de resistência dos concretos, de C20 a C40. Para cada classe de resistência serão preparados concretos de duas diferentes classes de abatimento e, para cada classe de abatimento, diferentes dimensões máximas características do agregado graúdo (TABELAS 5 e 6).

Tabela 5 - Concretos com $D_{m\acute{a}x}$ de 19,0 mm.

GRUPO	IDENTIFICAÇÃO	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CLASSE DE ABATIMENTO	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)
A	T1	C20	S100	19,0
	T2	C25		
	T3	C30		
	T4	C35		
	T5	C40		
B	T6	C20	S160	19,0
	T7	C25		
	T8	C30		
	T9	C35		
	T10	C40		

Fonte: Do autor.

Tabela 6 - Concretos com $D_{m\acute{a}x}$ de 12,5 mm.

GRUPO	IDENTIFICAÇÃO	CLASSE DE RESISTÊNCIA	CLASSE DE ABATIMENTO	$D_{m\acute{a}x}$ (mm)
C	T11	C20	S100	12,5
	T12	C25		
	T13	C30		
	T14	C35		
	T15	C40		
D	T16	C20	S160	12,5
	T17	C25		
	T18	C30		
	T19	C35		
	T20	C40		

Fonte: Do autor.

3.1 Materiais e dosagens

Os materiais constituintes e as dosagens do concreto foram os mesmos utilizados na central dosadora de concreto. Foi utilizado o cimento CP II F 40 Itambé, de acordo com a NBR 11578:1997, com as características químicas, físicas e mecânicas apresentadas nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Características químicas do cimento

DETERMINAÇÕES QUÍMICAS	RESULTADOS	LIMITES DA NBR 11578 (% da massa)
Resíduo insolúvel	1,35	≤ 2,5
Perda ao fogo	5,12	≤ 6,5
Óxido de magnésio	4,31	≤ 6,5
Trióxido de enxofre	3,01	≤ 4,0

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Tabela 8 - Características físicas e mecânicas do cimento

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES		RESULTADOS	LIMITES DA NBR 11578
	Resíduo na peneira 75 μ m (%)	0,07	$\leq 10,0$
Finura	Resíduo na peneira 45 μ m (%)	0,58	-
	Área específica (cm ² /g)	4364	≤ 2800
	Tempo de início de pega (h:min)	03:17	≥ 1
	Tempo de fim de pega (h:min)	04:03	≤ 10
	Expansibilidade a quente (mm)	0,10	≤ 5
	1 dia	22,5	-
Resistência à compressão (MPa)	3 dias	38,3	$\geq 15,0$
	7 dias	44,5	$\geq 25,0$
	28 dias	54,0	$\geq 40,0$
	Massa específica (g/cm ³)	3,08	-

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Foi utilizada cinza volante, oriunda da queima de carvão mineral em usinas termoelétricas, classe C conforme a NBR 12653:2014, como adição pozolânica em substituição parcial ao cimento, cujas características químicas e físicas são apresentadas nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Características químicas da cinza volante

DETERMINAÇÕES QUÍMICAS	RESULTADOS	LIMITES DA NBR 12653 (% da massa)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	90,7	$\geq 70,0$
SO ₃	0,34	$\leq 5,0$
Perda ao fogo	1,80	$\leq 6,0$

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Tabela 10 - Características físicas da cinza volante

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES		RESULTADOS	LIMITES DA NBR 12653
	Resíduo na peneira 75 μ m (%)	0,2	-
Finura	Resíduo na peneira 45 μ m (%)	2,0	$\leq 34,0$
	Área específica (cm ² /g)	5260	-
	Massa específica (g/cm ³)	2,25	-

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

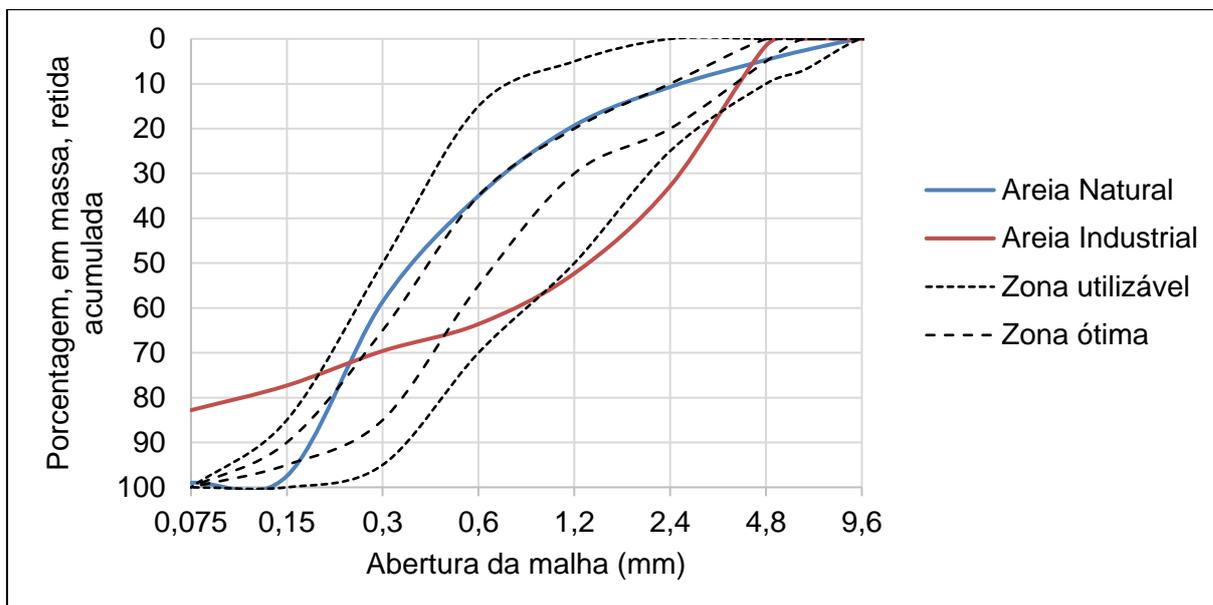
Dois tipos de agregados miúdos foram utilizados nos concretos: uma areia natural de origem quartzosa extraída de rio, e uma areia industrial produzida através de processo de britagem de rocha basáltica, conforme NBR 7211:2009. As características físicas dos agregados miúdos são apresentadas na Tabela 11 e a Figura 14 apresenta o gráfico da granulometria das areias.

Tabela 11 - Características físicas dos agregados miúdos

ABERTURA DA PENEIRA	PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA	
	AREIA NATURAL	AREIA INDUSTRIAL
9,5 mm	0,0	0,0
6,3 mm	2,6	0,0
4,75 mm	4,7	1,5
2,36 mm	10,7	32,8
1,18 mm	19,3	52,3
600 μ m	35,0	63,6
300 μ m	58,6	69,6
150 μ m	97,5	77,3
Material pulverulento (%)	1,0	17,2
Módulo de finura	2,26	2,97
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	4,8
Massa específica (g/cm ³)	2,63	2,93
Massa unitária (g/cm ³)	1,52	1,74

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

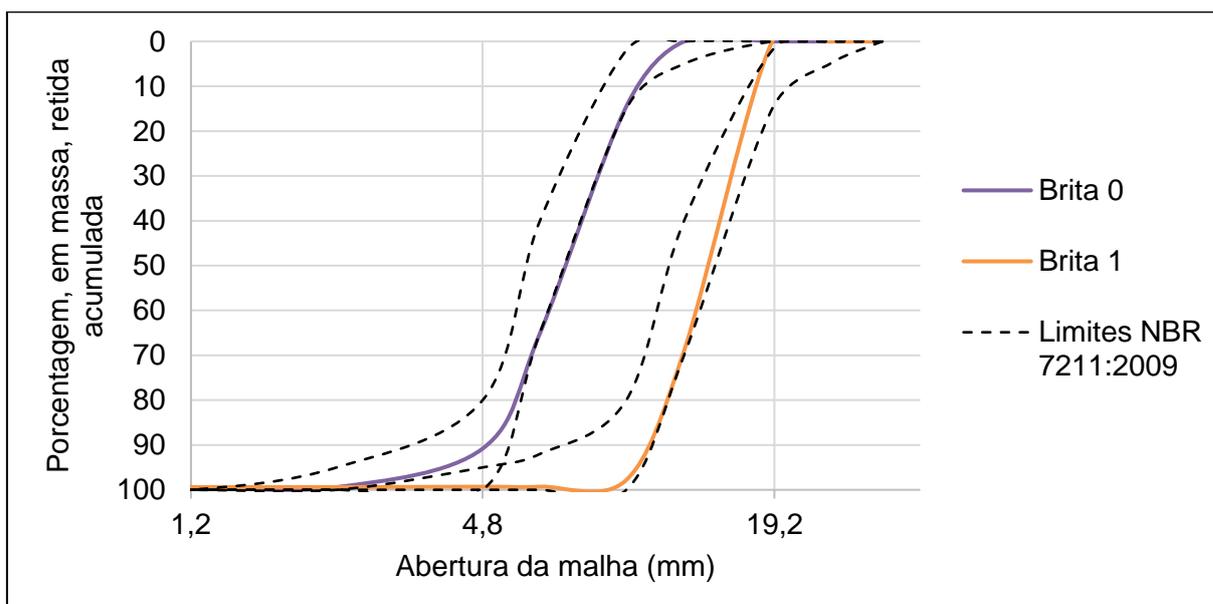
Figura 14 - Gráfico da granulometria dos agregados miúdos



Fonte: Autor.

Os agregados graúdos (TABELA 12; FIGURA 15) a serem utilizados são de origem basáltica e possuem dimensão máxima característica distintas, sendo a Brita #0 com $D_{máx} = 12,5$ mm e a Brita #1 com $D_{máx} = 19,0$ mm.

Figura 15 - Distribuição granulométrica da Brita 0 e Brita 1



Fonte: Autor.

Tabela 12 - Características físicas dos agregados graúdos

ABERTURA DA PENEIRA	PORCENTAGEM, EM MASSA, RETIDA ACUMULADA	
	BRITA #0	BRITA #1
19,0 mm	0,0	0,0
12,5 mm	0,0	69,0
9,5 mm	14,5	97,8
6,3 mm	65,1	99,3
4,75 mm	90,8	99,3
2,36 mm	99,4	99,4
1,18 mm	99,4	99,4
600 μm	99,4	99,4
300 μm	99,4	99,4
150 μm	99,5	99,4
Material pulverulento (%)	0,5	0,5
Módulo de finura	6,02	6,94
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	19,0
Massa específica (g/cm^3)	2,96	2,94
Massa unitária (g/cm^3)	1,43	1,40
Absorção (%)	2,26	1,86

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

A água que foi utilizada para a preparação dos concretos em laboratório é proveniente de poço artesiano de acordo com a NBR 15900-1:2009. Ainda, foi utilizado aditivo plastificante polifuncional Eucon PL 300 e aditivo superplastificante Plastoflow 7025, conforme a NBR 11768:2011.

Os traços dos concretos em estudo foram disponibilizados pela central dosadora e seus parâmetros são apresentados nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 que correspondem aos traços do Grupo A, B, C e D, respectivamente.

Tabela 13 - Traços dos concretos do grupo A

TRAÇOS DOS CONCRETOS GRUPO A					
Identificação	T1	T2	T3	T4	T5
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40
Cimento (kg/m ³)	204	231	259	294	327
Pozolana (kg/m ³)	90	90	90	90	90
Areia Nat. (kg/m ³)	570	554	537	516	496
Areia Ind. (kg/m ³)	380	369	358	344	331
Brita #0 (kg/m ³)	244	244	244	244	244
Brita #1 (kg/m ³)	733	733	733	733	733
Água (kg/m ³)	190	190	192	190	197
Aditivo Plastificante (kg/m ³)	2,94	3,21	3,49	3,84	5,00
Aditivo Superplastificante (kg/m ³)	-	-	-	-	-
a/c ¹	0,646	0,592	0,552	0,495	0,476
α (%) ²	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
m (kg/kg) ³	6,55	5,92	5,36	4,78	4,33
H (%) ⁴	8,55	8,55	8,68	8,55	8,93
Slump (mm)	120±20	120±20	120±20	120±20	120±20

¹ Relação água/(cimento+pozolana).

² Teor de argamassa da mistura.

³ Relação agregados secos/cimento.

⁴ Relação água/materiais secos.

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Tabela 14 - Traços dos concretos do grupo B

TRAÇOS DOS CONCRETOS GRUPO B					
Identificação	T6	T7	T8	T9	T10
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40
Cimento (kg/m ³)	189	218	249	281	313
Pozolana (kg/m ³)	90	90	90	90	90
Areia Nat. (kg/m ³)	595	577	559	539	520
Areia Ind. (kg/m ³)	396	385	372	360	347
Brita #0 (kg/m ³)	240	240	240	240	240
Brita #1 (kg/m ³)	719	719	719	719	719
Água (kg/m ³)	187	187	187	187	187
Aditivo Plastificante (kg/m ³)	1,40	1,54	1,70	1,86	2,02
Aditivo Superplastificante (kg/m ³)	2,79	3,08	3,39	3,71	4,03
a/c ¹	0,670	0,607	0,552	0,504	0,464
α (%) ²	57,0	57,0	57,0	57,0	57,0
m (kg/kg) ³	6,99	6,23	5,57	5,01	4,53
H (%) ⁴	8,39	8,39	8,39	8,39	8,39
Slump (mm)	190±30	190±30	190±30	190±30	190±30

¹ Relação água/(cimento+pozolana).

² Teor de argamassa da mistura.

³ Relação agregados secos/cimento.

⁴ Relação água/materiais secos.

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Tabela 15 – Traços dos concretos do grupo C

TRAÇOS DOS CONCRETOS GRUPO C					
Identificação	T11	T12	T13	T14	T15
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40
Cimento (kg/m ³)	215	245	275	310	355
Pozolana (kg/m ³)	90	90	90	90	90
Areia Nat. (kg/m ³)	554	536	518	497	470
Areia Ind. (kg/m ³)	369	357	345	331	313
Brita #0 (kg/m ³)	965	965	965	965	965
Brita #1 (kg/m ³)	-	-	-	-	-
Água (kg/m ³)	208	200	209	205	211
Aditivo Plastificante (kg/m ³)	3,05	3,35	3,65	4,00	5,34
Aditivo Superplastificante (kg/m ³)	-	-	-	-	-
a/c^1	0,689	0,597	0,578	0,517	0,481
α (%) ²	56,0	56,0	56,0	56,0	56,0
m (kg/kg) ³	6,19	5,55	5,01	4,48	3,93
H (%) ⁴	9,58	9,12	9,63	9,42	9,75
Slump (mm)	120±20	120±20	120±20	120±20	120±20

¹ Relação água/(cimento+pozolana).

² Teor de argamassa da mistura.

³ Relação agregados secos/cimento.

⁴ Relação água/materiais secos.

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Tabela 16 - Traços dos concretos do grupo D

TRAÇOS DOS CONCRETOS GRUPO D					
Identificação	T16	T17	T18	T19	T20
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40
Cimento (kg/m ³)	199	230	262	296	330
Pozolana (kg/m ³)	90	90	90	90	90
Areia Nat. (kg/m ³)	592	573	554	534	513
Areia Ind. (kg/m ³)	394	382	369	356	342
Brita #0 (kg/m ³)	923	923	923	923	923
Brita #1 (kg/m ³)	-	-	-	-	-
Água (kg/m ³)	197	197	197	197	197
Aditivo Plastificante (kg/m ³)	1,45	1,60	1,76	1,93	2,10
Aditivo Superplastificante (kg/m ³)	2,89	3,20	3,52	3,86	4,20
a/c ¹	0,682	0,616	0,560	0,510	0,424
α (%) ²	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0
m (kg/kg) ³	6,61	5,87	5,25	4,70	4,24
H (%) ⁴	8,96	8,96	8,96	8,96	8,96
Slump (mm)	190±30	190±30	190±30	190±30	190±30

¹ Relação água/(cimento+pozolana).

² Teor de argamassa da mistura.

³ Relação agregados secos/cimento.

⁴ Relação água/materiais secos.

Fonte: Adaptado pelo autor de bancos de dados da central dosadora de concreto.

Todos os materiais empregados na confecção dos traços em laboratório foram dosados em massa com o auxílio de uma balança e misturados em uma betoneira de capacidade nominal de 120 litros seguindo o processo de dosagem do método IBRACON, que recomenda a seguinte sequência de atividades (TUTIKIAN; HELENE, 2011):

- 1) Imprimir a betoneira com uma porção de argamassa e deixar que o material excedente caia livremente com a abertura da betoneira voltada para baixo;
- 2) Introduzir os materiais de forma individual dentro da betoneira obedecendo-se à seguinte ordem: água (80%), agregado graúdo (100%), cimento (100%), pozolana (100%), aditivo (100%), agregado miúdo (100%) e, por fim, o restante da água (20%);
- 3) Após lançar todos os materiais na betoneira, deve-se misturá-los por 5 minutos, fazendo uma parada intermediária para limpeza do material aderido às pás da betoneira.

3.2 Métodos de ensaios

Foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de dimensões 10 cm x 20 cm para cada idade de controle, para cada traço, conforme a NBR 5738:2015. As idades adotadas foram 3, 7, 28 e 63 dias. A cura, preparação das bases, determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dos corpos de prova foram realizadas no Laboratório de Tecnologias de Construção da UNIVATES (LATEC).

Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura em câmara úmida à temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e 100% de umidade relativa do ar. A preparação das bases dos corpos de prova, no dia dos ensaios, foi realizada por retificação em retífica manual.

A determinação da resistência à compressão foi realizada em 2 corpos de prova de cada traço, conforme a NBR 5739:2007, em uma prensa com capacidade para 200 toneladas. Com os dados da tensão de ruptura à compressão, foi calculado o percentual da carga última para a determinação do módulo de elasticidade tangente inicial, de acordo com a NBR 8522:2008.

Foram utilizados 3 corpos de provas de cada traço para a determinação do módulo de elasticidade, através da Metodologia A prescrita na NBR 8522:2008, aplicando um plano de carga partindo de 0,5 MPa até 30% da carga última. Foi utilizada a mesma prensa onde foram feitos os ensaios de resistência à compressão com a utilização de extensômetros eletrônicos de configuração dupla.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados e discussão dos ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade de todos os concretos confeccionados no programa experimental. É apresentado também a evolução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade ao longo do tempo bem como as relações entre essas duas propriedades.

4.1 Resistência à compressão

A Tabela 17 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão e a relação f_{cmj}/f_{cm} de todos os concretos. A faixa de resistência à compressão média obtida aos 28 dias para o grupo A foi de 28,3 a 55,6 MPa, para o grupo B foi de 26,9 a 65,4 MPa, para o grupo C foi de 25,0 MPa até 52,9 MPa e para o grupo D foi de 27,7 MPa a 58,8 MPa. As Figuras 14 a 17 mostram os gráficos com os valores de resistência à compressão em função da idade de todos os concretos.

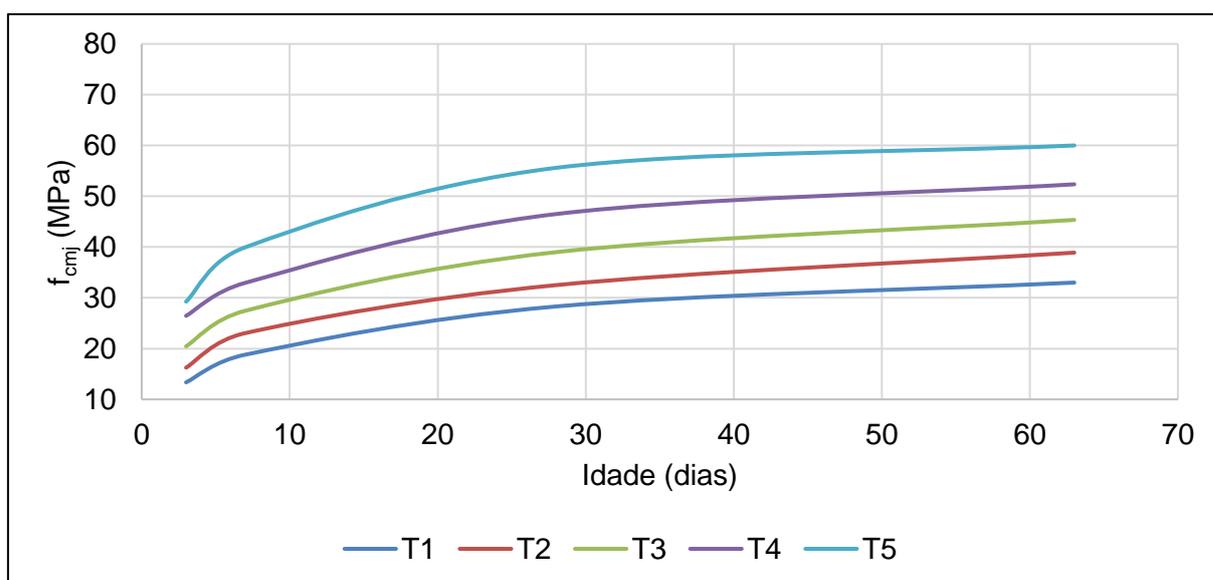
As figuras 18 a 21 mostram os gráficos com as relações f_{cmj}/f_{cm} médias considerando as idades de 3, 7, 28 e 63 dias, sendo para o grupo A de: 0,52, 0,70, 1,00, 1,15; para o grupo B: 0,51, 0,70, 1,00, 1,16; para o grupo C: 0,54, 0,69, 1,00, 1,17; para o grupo D: 0,49, 0,67, 1,00, 1,12. Todos os traços apresentaram a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo muito semelhante, o que mostra que a variação de abatimento e de dimensão máxima característica do agregado graúdo não influenciaram nesse aspecto, por isso, foi possível estabelecer uma única relação f_{cmj}/f_{cm} para todos os concretos (FIGURA 22).

Tabela 17 - Resultados de f_{cmj} e f_{cmj}/f_{cm} de todos os concretos

GRUPO	TRAÇO	f_{cm3} (MPa)	f_{cm7} (MPa)	f_{cm28} (MPa)	f_{cm63} (MPa)	f_{cm3}/f_{cm}	f_{cm7}/f_{cm}	f_{cm}	f_{cm63}/f_{cm}
A	T1	13,4	18,8	28,3	33,0	0,47	0,66	1,00	1,17
	T2	16,3	23,1	32,5	38,9	0,50	0,71	1,00	1,20
	T3	20,5	27,5	39,0	45,4	0,52	0,70	1,00	1,16
	T4	26,5	33,0	46,5	52,4	0,57	0,71	1,00	1,13
	T5	29,3	40,0	55,6	60,0	0,53	0,72	1,00	1,08
B	T6	13,1	18,2	26,9	34,0	0,49	0,67	1,00	1,26
	T7	19,2	26,4	38,3	45,2	0,50	0,69	1,00	1,18
	T8	23,3	32,3	45,9	54,0	0,51	0,70	1,00	1,18
	T9	27,8	39,1	55,1	61,0	0,50	0,71	1,00	1,11
	T10	34,9	46,4	65,4	70,2	0,53	0,71	1,00	1,07
C	T11	12,4	15,8	25,0	31,6	0,50	0,63	1,00	1,26
	T12	19,0	23,0	35,1	40,3	0,54	0,65	1,00	1,15
	T13	21,9	27,1	37,7	45,3	0,58	0,72	1,00	1,20
	T14	24,7	32,2	45,4	49,7	0,54	0,71	1,00	1,09
	T15	28,9	39,5	52,9	61,9	0,55	0,75	1,00	1,17
D	T16	12,1	16,2	27,7	32,4	0,44	0,58	1,00	1,17
	T17	16,2	21,4	33,7	39,1	0,48	0,63	1,00	1,16
	T18	21,1	28,5	43,7	49,1	0,48	0,65	1,00	1,12
	T19	27,6	36,4	51,4	56,5	0,54	0,71	1,00	1,10
	T20	31,6	44,9	58,8	63,2	0,54	0,76	1,00	1,07

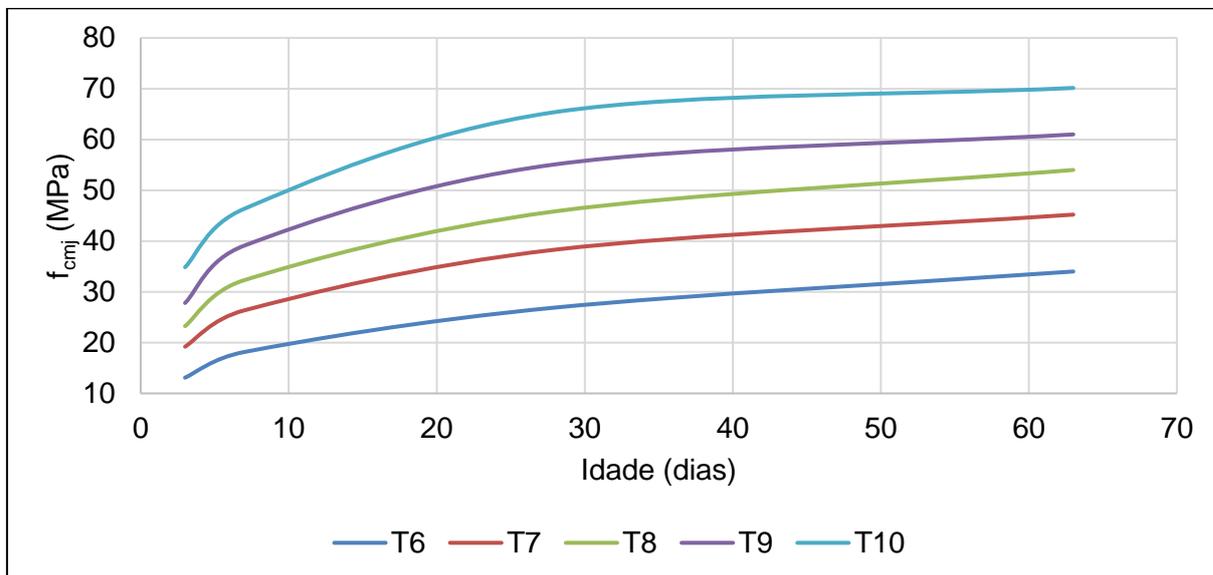
Fonte: Autor.

Figura 16 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo A



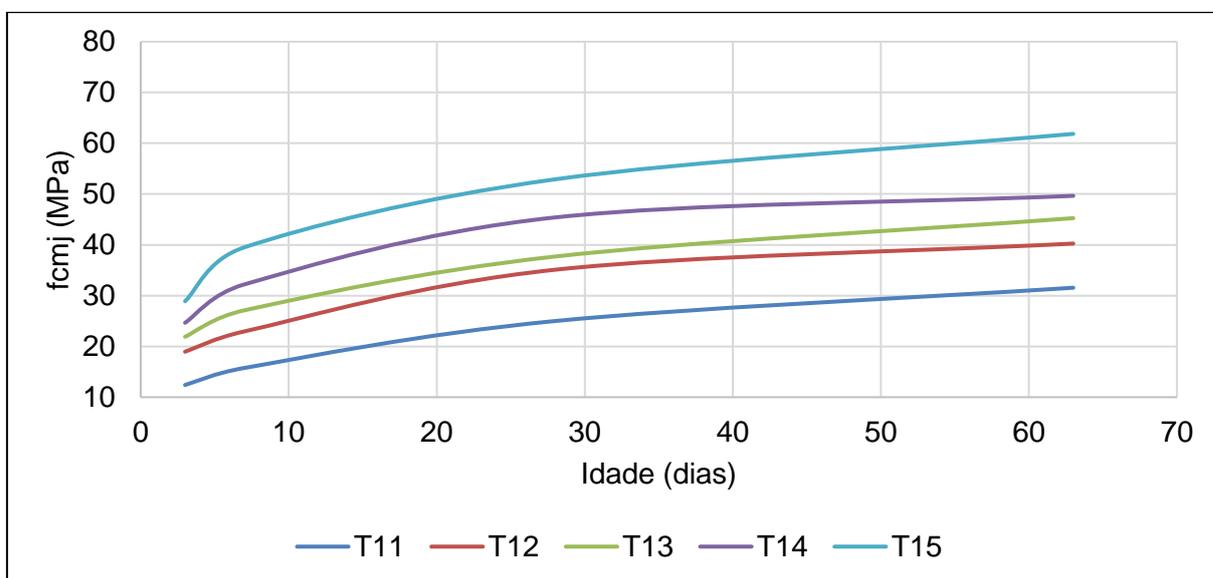
Fonte: Autor.

Figura 17 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo B



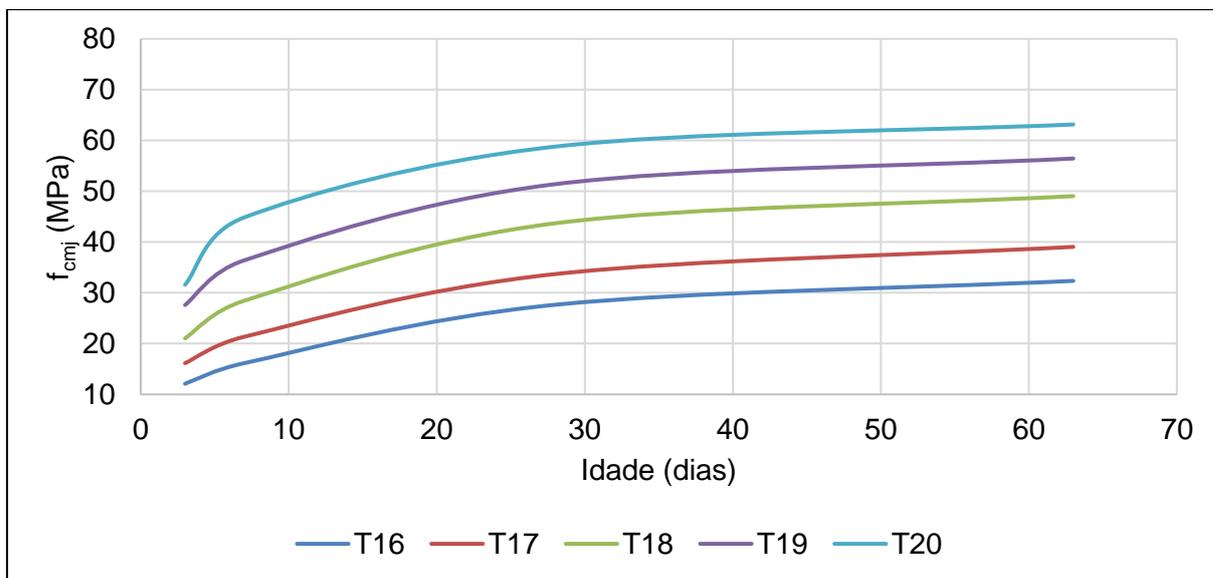
Fonte: Autor.

Figura 18 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo C

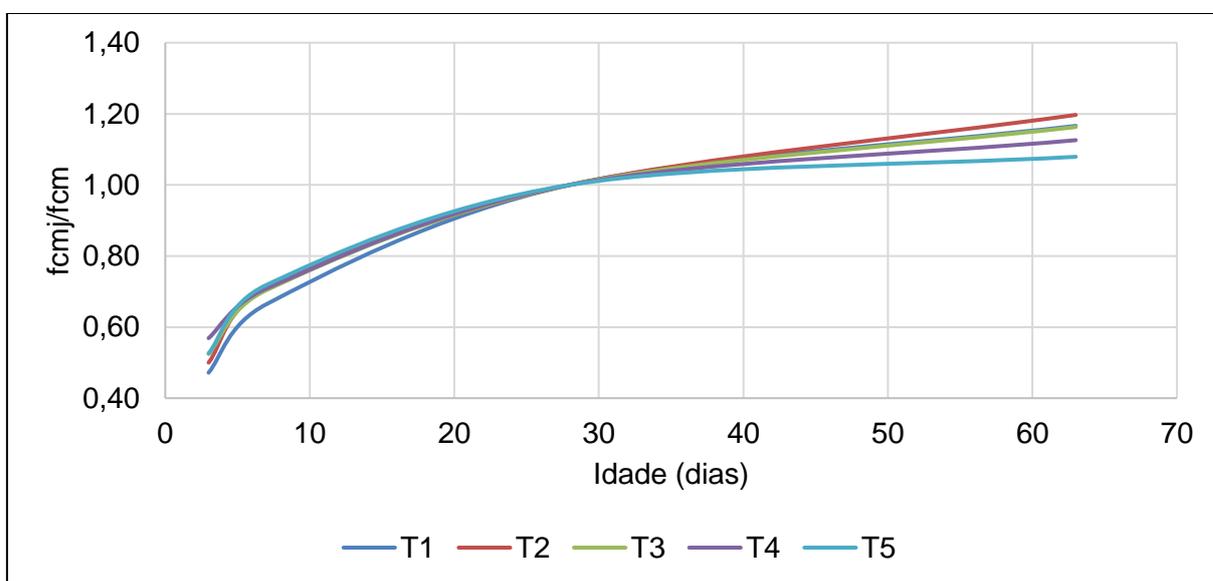


Fonte: Autor.

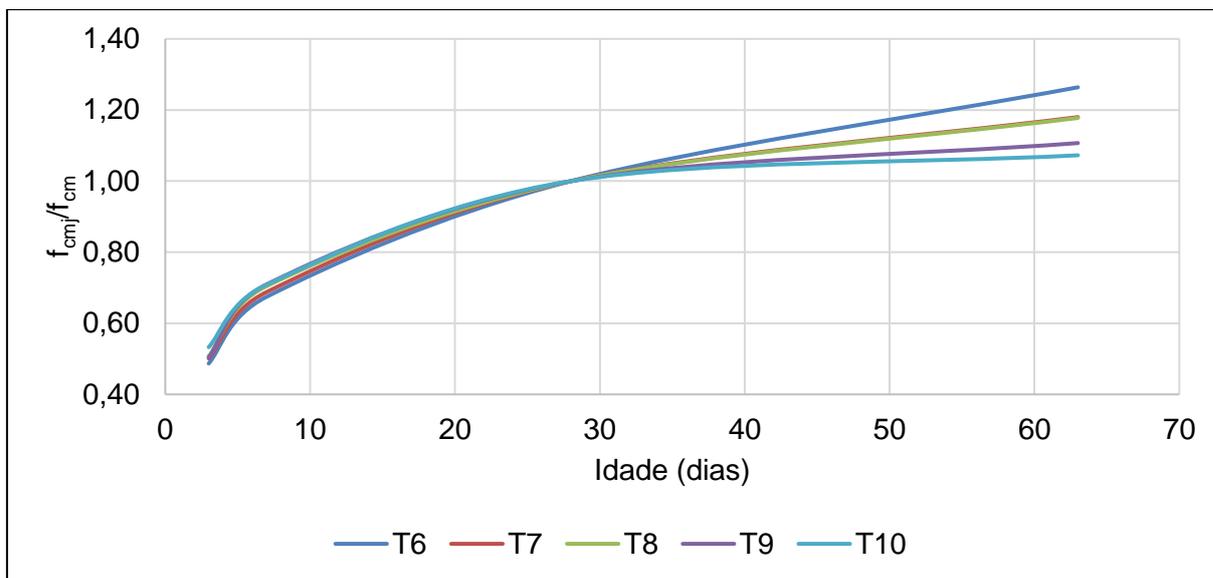
Figura 19 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos do grupo D



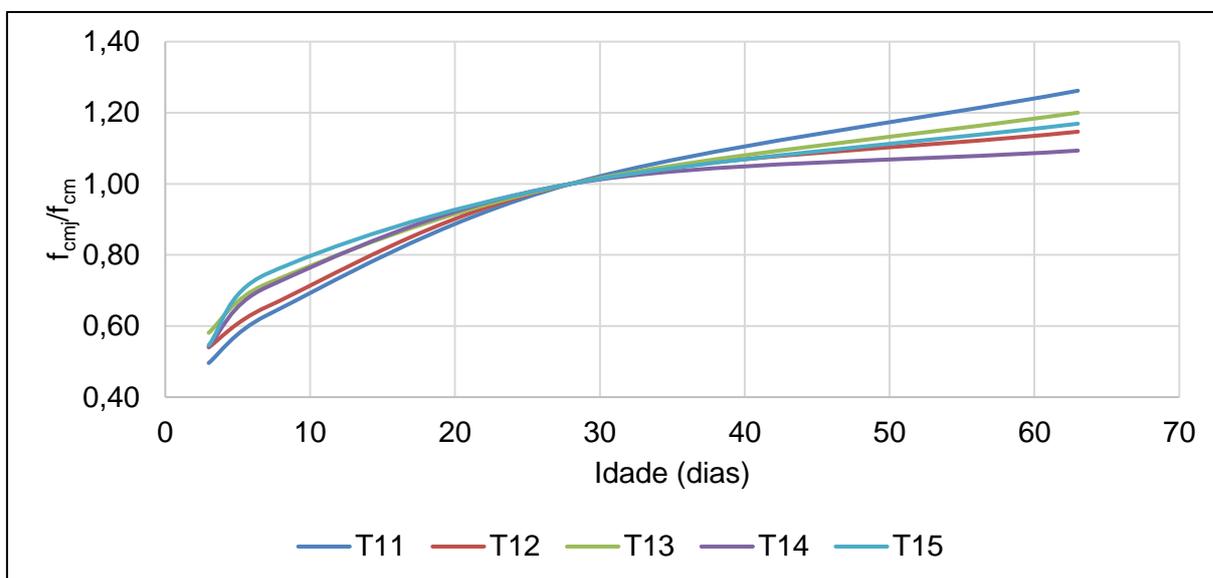
Fonte: Autor.

Figura 20 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo A

Fonte: Autor.

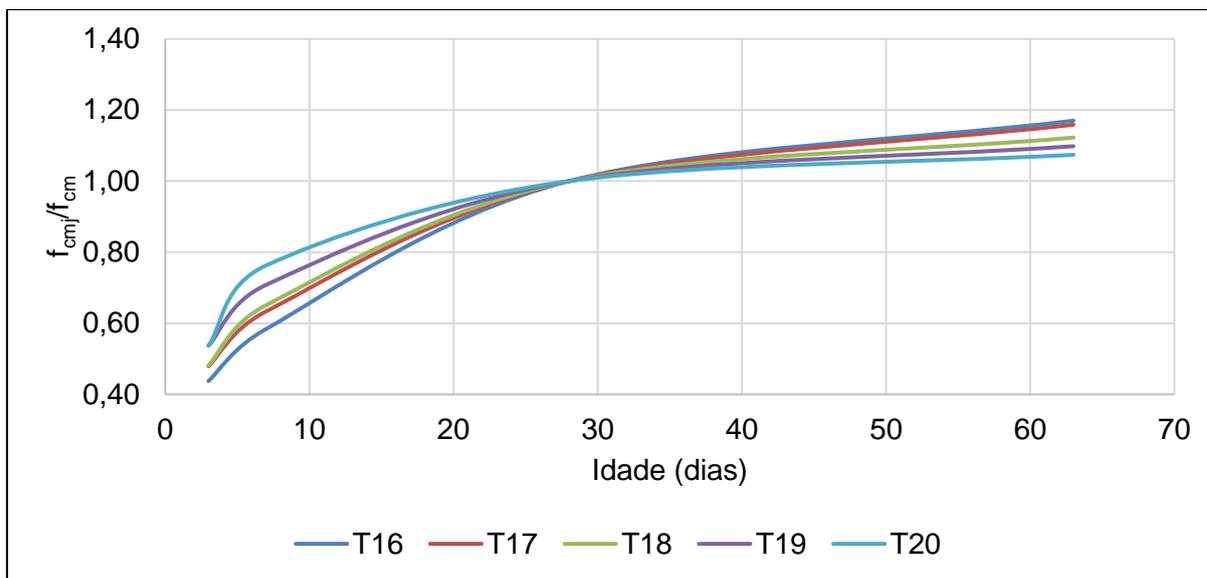
Figura 21 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo B

Fonte: Autor.

Figura 22 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo C

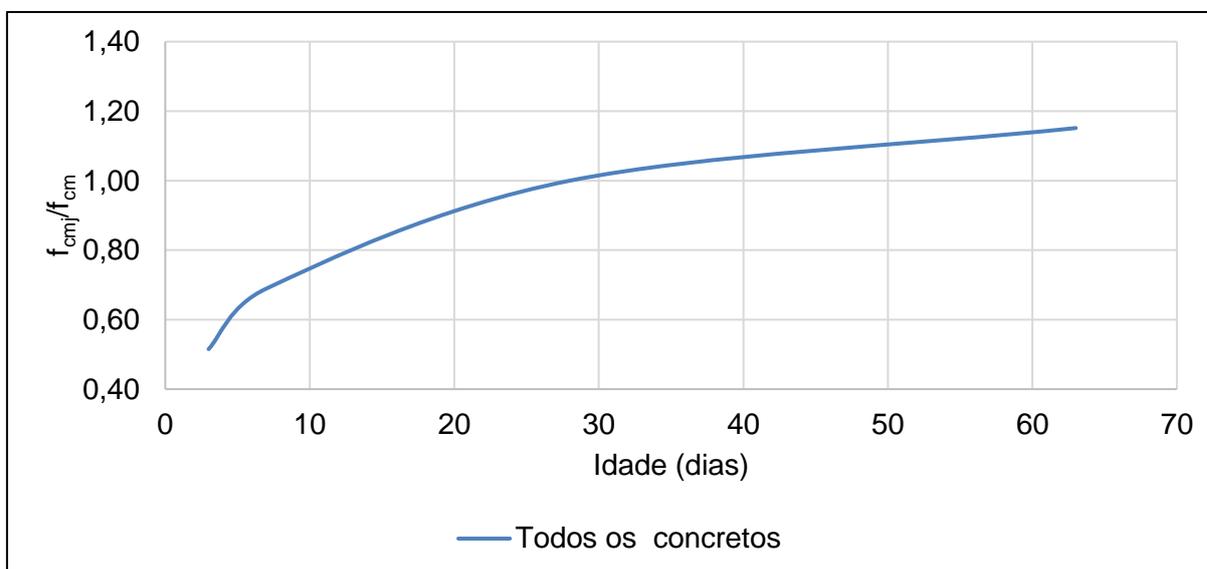
Fonte: Autor.

Figura 23 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade dos concretos do grupo D



Fonte: Autor.

Figura 24 - Relação f_{cmj}/f_{cm} em função da idade de todos os concretos



Fonte: Autor.

4.2 Módulo de elasticidade

Os valores médios obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade e a relação E_{cij}/E_{ci} de todos os concretos são apresentados na Tabela 18. O grupo A apresentou valores médios de módulo de elasticidade aos 28 dias na faixa de 29,4 a 35,5 GPa,

o grupo B apresentou valores de 31,3 até 37,7 GPa, o grupo C apresentou valores de 30,0 até 34,4 GPa e o grupo D, de 29,7 até 35,7 GPa.

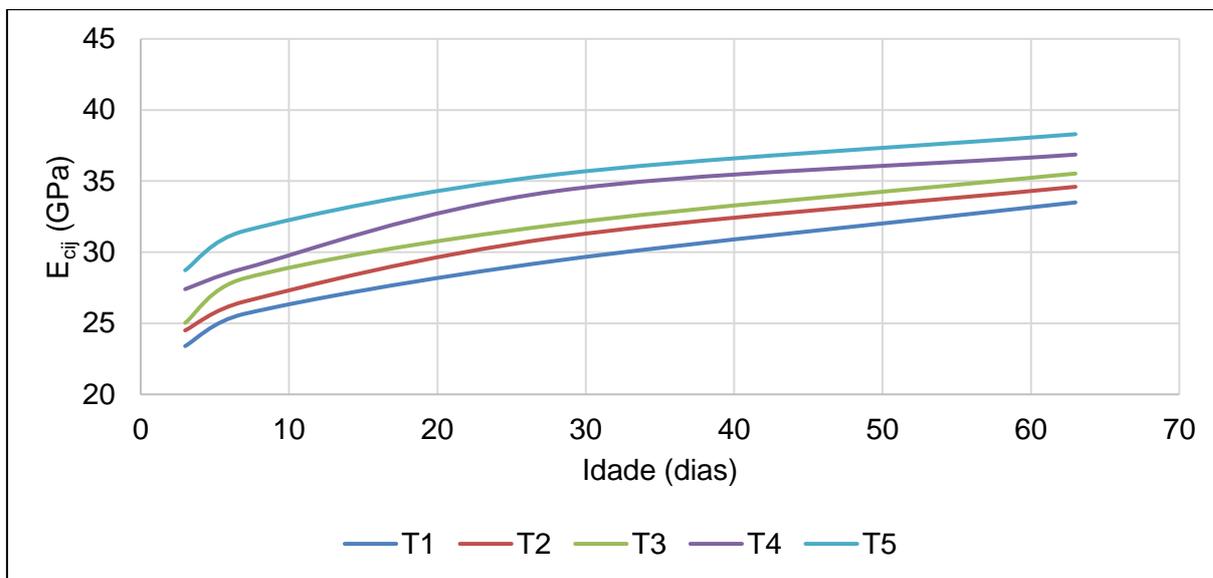
Tabela 18 - Valores de E_{cij} e E_{cij}/E_{ci} de todos os concretos

GRUPO	TRAÇO	E_{ci3} (GPa)	E_{ci7} (GPa)	E_{ci28} (GPa)	E_{ci63} (GPa)	E_{ci3}/E_{ci}	E_{ci7}/E_{ci}	E_{ci}	E_{ci63}/E_{ci}
A	T1	23,4	25,7	29,4	33,5	0,80	0,87	1,00	1,14
	T2	24,5	26,5	31,0	34,6	0,79	0,85	1,00	1,11
	T3	25,0	28,2	31,9	35,5	0,78	0,88	1,00	1,11
	T4	27,4	28,9	34,3	36,9	0,80	0,84	1,00	1,07
	T5	28,7	31,5	35,5	38,3	0,81	0,89	1,00	1,08
B	T6	23,6	25,6	31,3	33,6	0,75	0,82	1,00	1,07
	T7	27,6	28,9	35,2	36,8	0,78	0,82	1,00	1,04
	T8	28,9	32,0	36,4	37,9	0,79	0,88	1,00	1,04
	T9	30,3	32,7	36,9	38,6	0,82	0,89	1,00	1,05
	T10	30,2	33,9	37,7	41,0	0,80	0,90	1,00	1,09
C	T11	21,9	24,3	30,0	32,2	0,73	0,81	1,00	1,07
	T12	25,1	27,3	32,0	34,2	0,78	0,85	1,00	1,07
	T13	25,8	27,7	32,3	34,9	0,80	0,86	1,00	1,08
	T14	26,6	29,0	33,2	35,1	0,80	0,87	1,00	1,06
	T15	27,1	29,3	34,4	35,6	0,79	0,85	1,00	1,03
D	T16	20,2	23,8	29,7	30,8	0,7	0,80	1,00	1,04
	T17	22,6	25,2	30,5	32,4	0,7	0,83	1,00	1,06
	T18	24,7	28,6	32,2	34,7	0,8	0,89	1,00	1,08
	T19	26,7	29,7	33,7	35,6	0,8	0,88	1,00	1,06
	T20	29,5	31,1	35,7	36,3	0,8	0,87	1,00	1,02

Fonte: Autor.

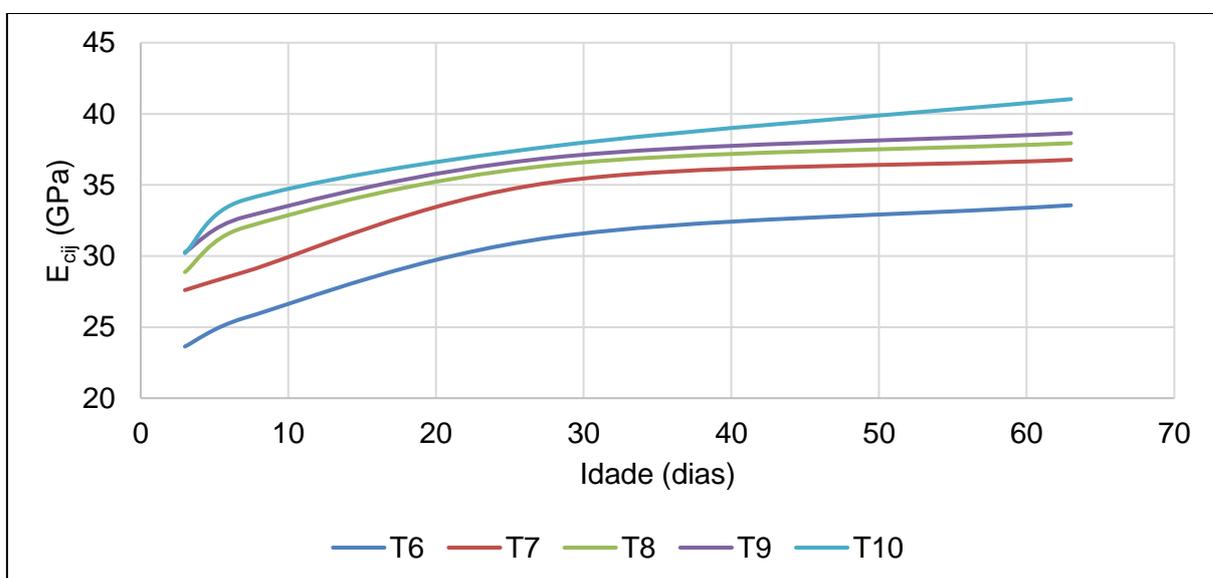
As Figuras 23 a 26 mostram os gráficos com os resultados obtidos de módulo de elasticidade em função da idade de todos os concretos e as figuras 27 a 30 apresentam os gráficos com as relações E_{cij}/E_{ci} médias considerando as idades de 3, 7, 28 e 63 dias, sendo para o grupo A de: 0,80, 0,87, 1,00, 1,10; para o grupo B: 0,79, 0,86, 1,00, 1,06; para o grupo C: 0,78, 0,85, 1,00, 1,06; para o grupo D: 0,76, 0,85, 1,00, 1,05. A Figura 31 mostra o gráfico com a relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade de todos os traços, visto que todos os concretos apresentaram a evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo muito próxima, não sofrendo influência pela variação do abatimento e dimensão máxima característica do agregado graúdo.

Figura 25 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo A



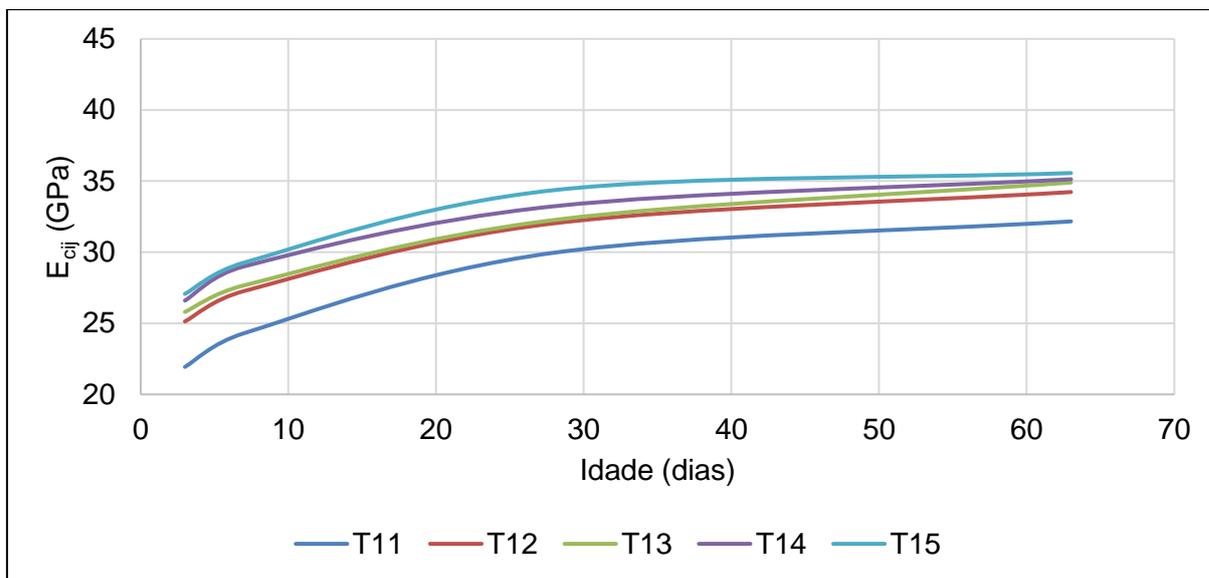
Fonte: Autor.

Figura 26 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo B



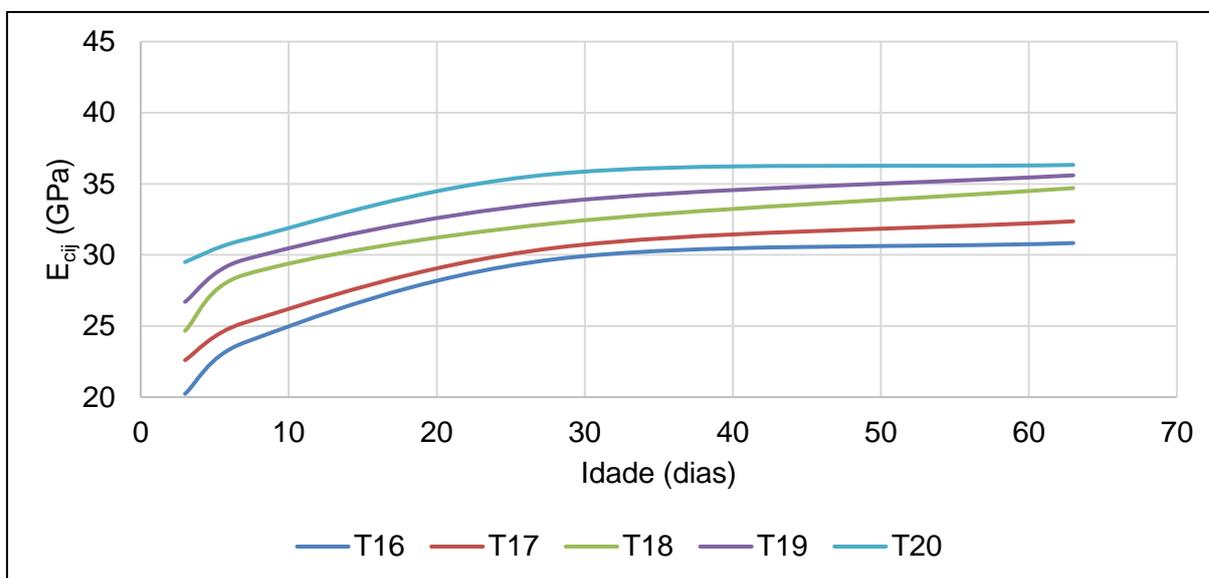
Fonte: Autor.

Figura 27 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo C

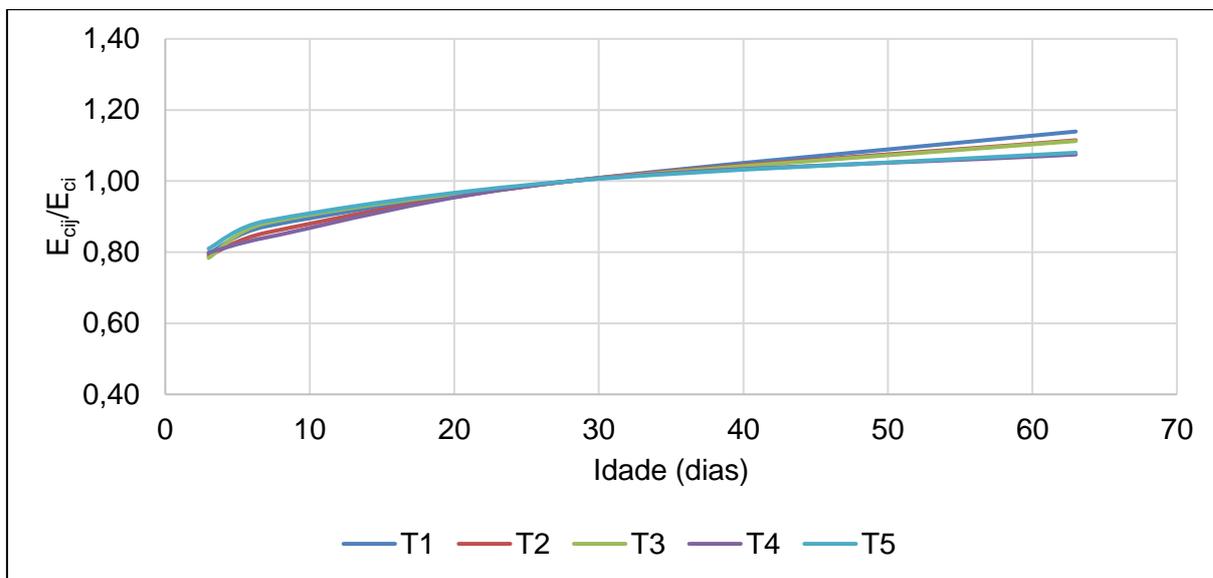


Fonte: Autor.

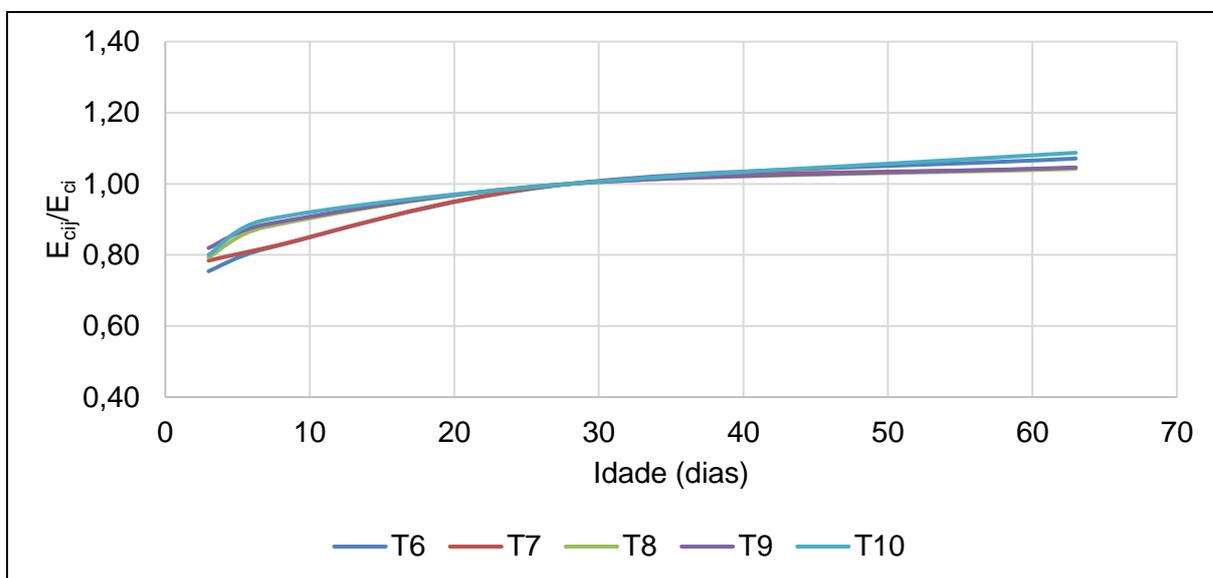
Figura 28 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos do grupo D



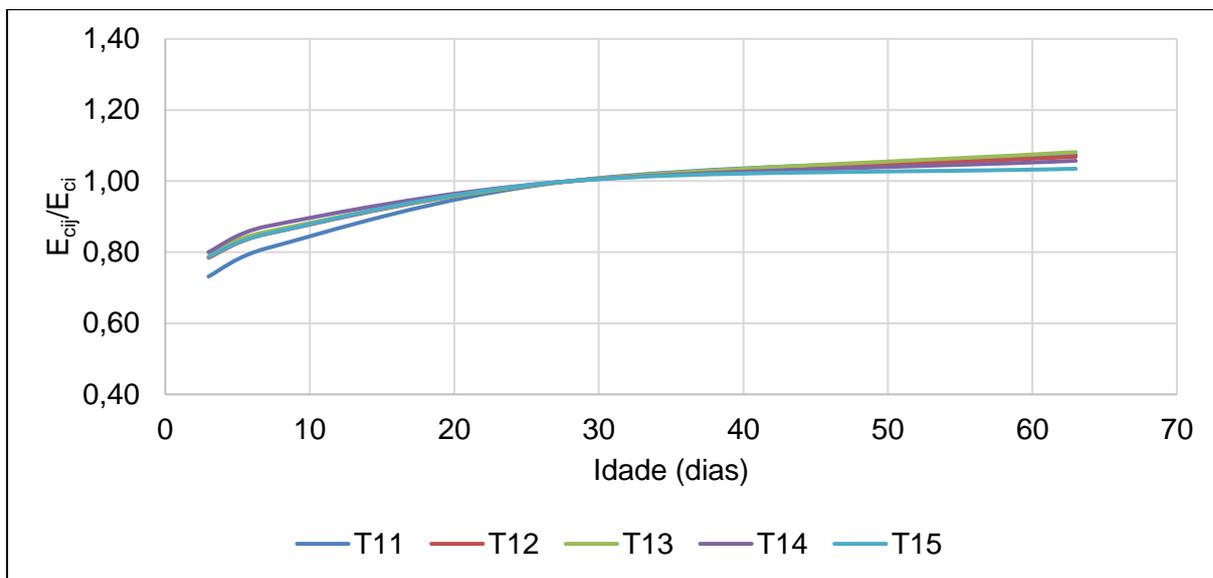
Fonte: Autor.

Figura 29 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo A

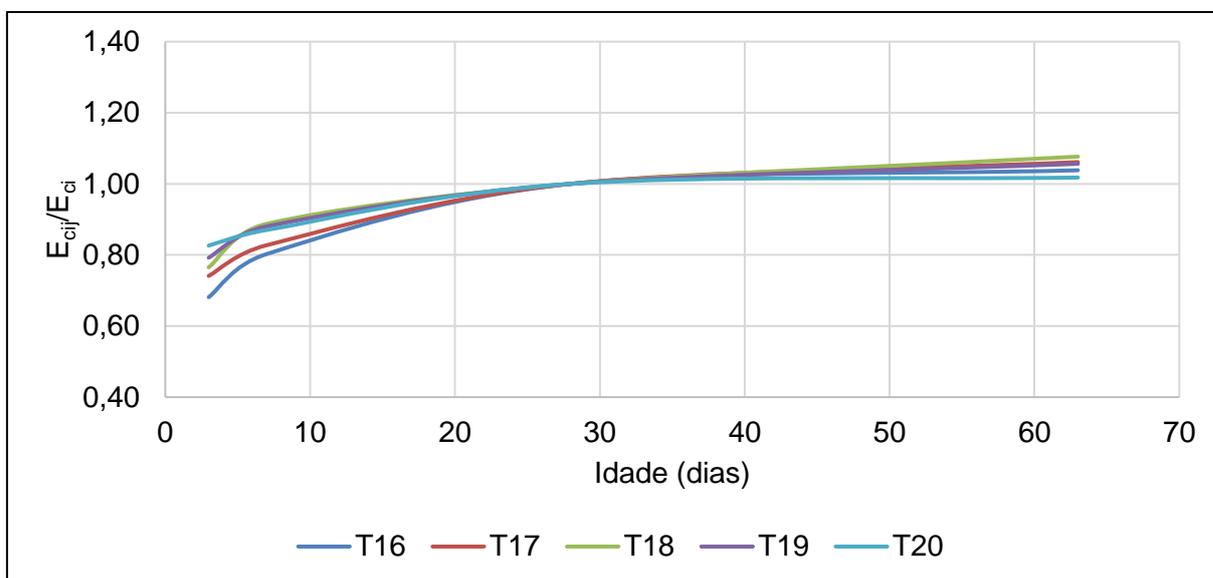
Fonte: Autor.

Figura 30 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo B

Fonte: Autor.

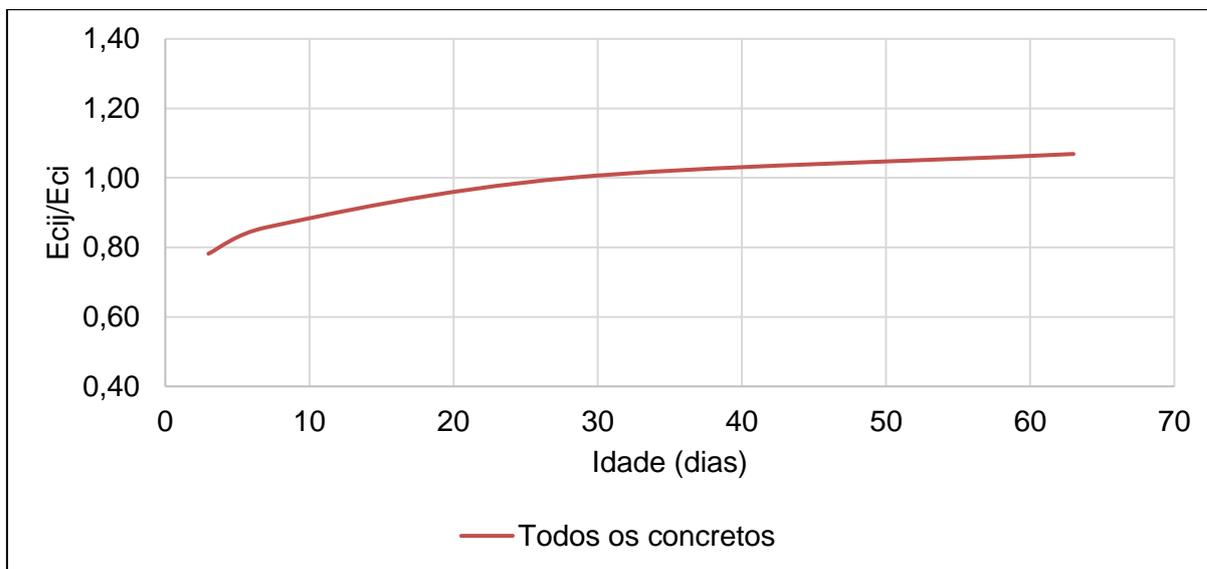
Figura 31 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo C

Fonte: Autor.

Figura 32 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade dos concretos do grupo D

Fonte: Autor.

Figura 33 - Relação E_{cij}/E_{ci} em função da idade de todos os concretos

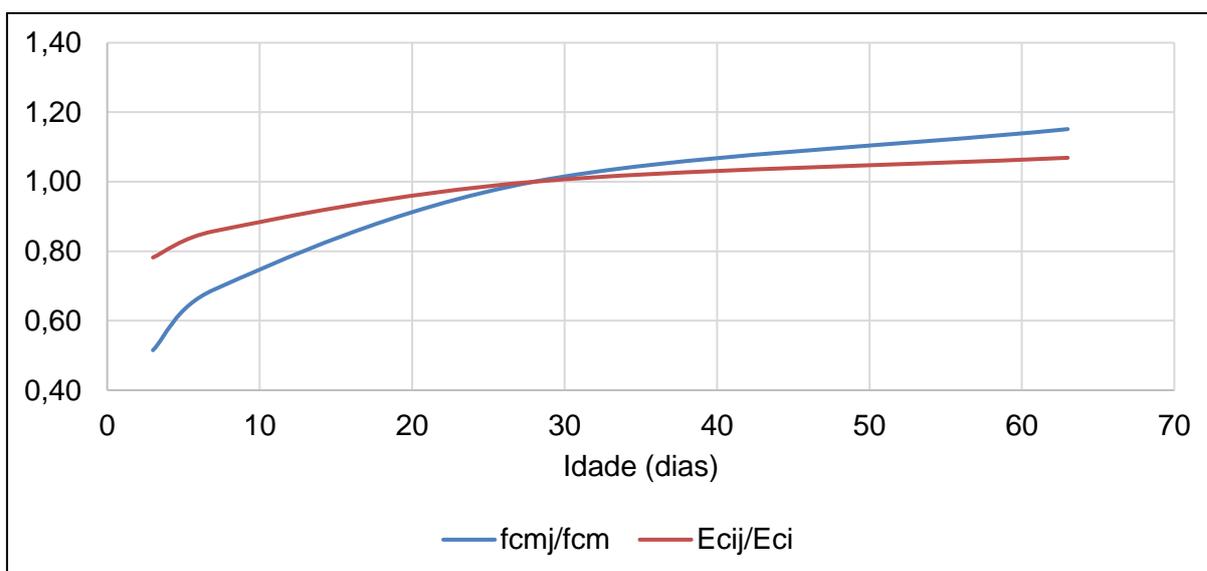


Fonte: Autor.

4.3 Relação f_{cmj}/f_{cm} e E_{cij}/E_{ci}

Na Figura 32 são apresentados os valores médios das relações f_{cmj}/f_{cm} e E_{cij}/E_{ci} de todos os concretos ensaiados em função da idade. É possível observar que, nas primeiras idades, E_{cij}/E_{ci} é significativamente maior que f_{cmj}/f_{cm} .

Figura 34 - Relação entre f_{cmj}/f_{cm} e E_{cij}/E_{ci} para todos os concretos



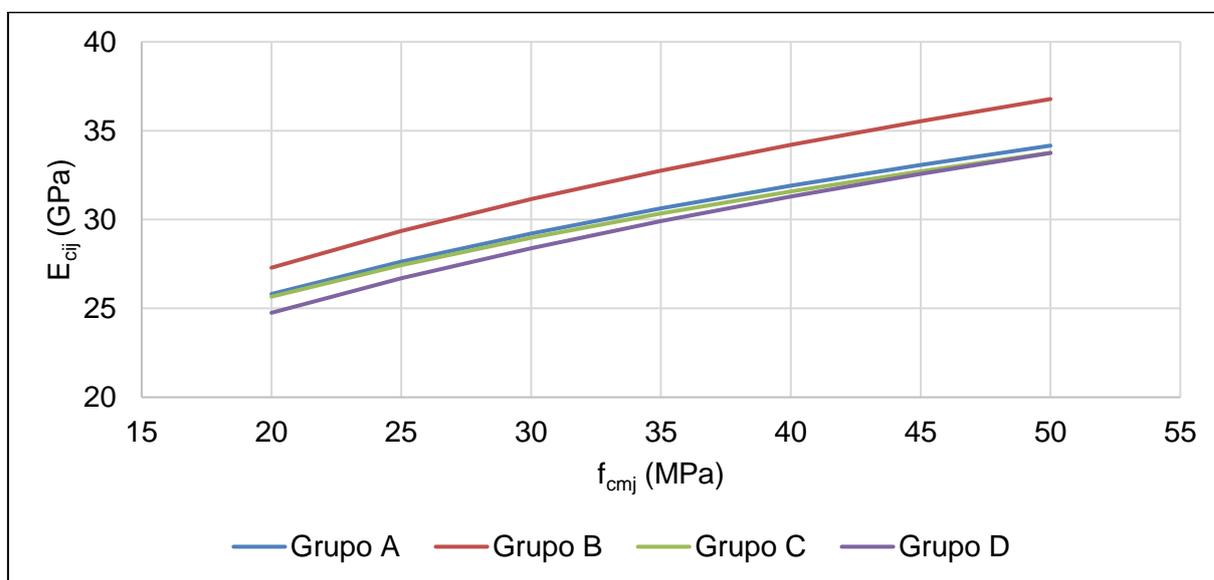
Fonte: Autor.

4.4 Relação entre E_{cij} e f_{cmj}

A NBR 6118:2014, em seu item 8.2.8, diz que pode-se estimar o valor do módulo de elasticidade através da resistência à compressão, quando não forem realizados ensaios, utilizando-se a Equação 6 para concretos de f_{ck} entre 20 MPa e 50 MPa, aos 28 dias. Tendo em vista a conclusão de Nunes (2005) de que essa estimativa também pode ser realizada para concretos com $3 \leq j \leq 28$ dias, foram utilizados os resultados de 3, 7 e 28 dias dos concretos para analisar a relação entre E_{cij} e f_{cmj} . Para as análises a seguir, foram desconsiderados os resultados do traço T10 por ter atingido uma resistência à compressão muito elevada.

Foi obtida uma equação para estimar E_{cij} em função de f_{cmj} para cada grupo e, a partir dessas equações (Eq. 15, 16, 17 e 18 – TABELA 19), construiu-se o gráfico apresentado na Figura 33 em que é possível observar que os grupos A, C e D apresentaram comportamento muito semelhante, enquanto o grupo B resultou em valores de E_{cij} aproximadamente 8% maiores em relação aos demais.

Figura 35 - Relação entre E_{cij} e f_{cmj} dos concretos

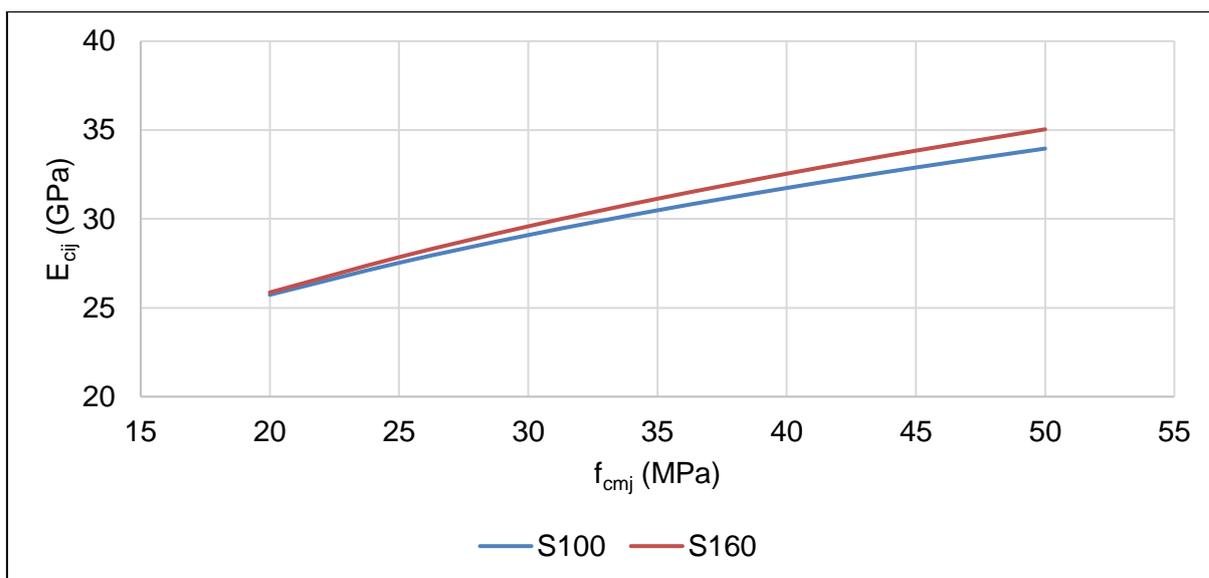


Fonte: Autor.

As Figuras 34 e 35 mostram os gráficos comparativos entre os concretos com classe de abatimento S100 e S160 e concretos com $D_{m\acute{a}x} = 19$ mm e 12,5 mm, respectivamente. É possível observar que a variação de abatimento pouco influenciou nos resultados do módulo de elasticidade, bem como a variação da

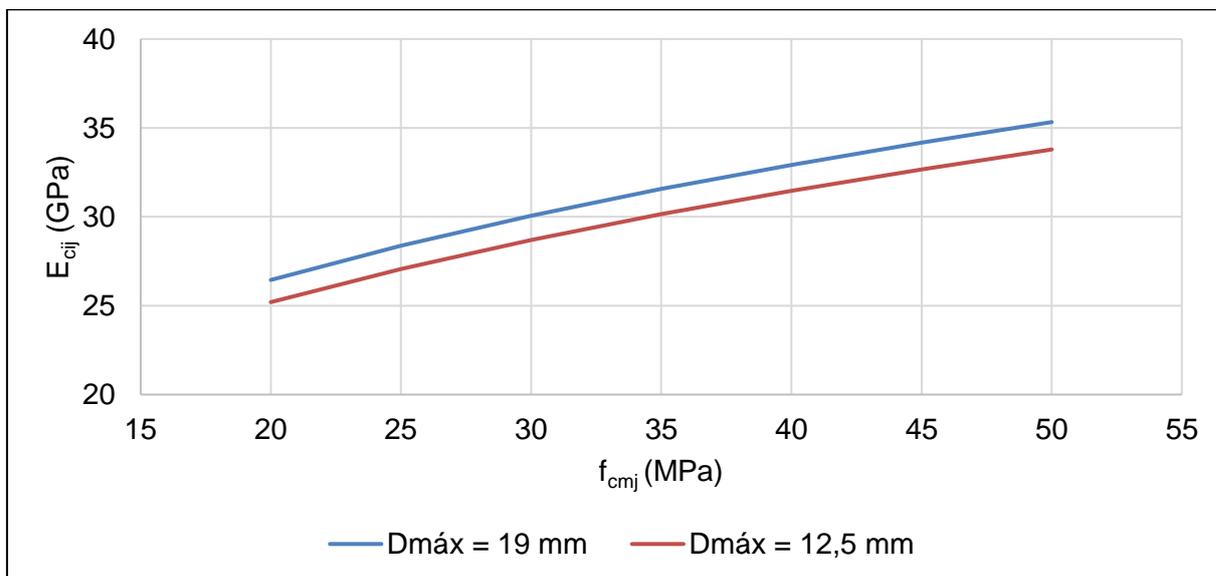
dimensão máxima do agregado graúdo, em que os concretos dosados com $D_{\text{máx}} = 19 \text{ mm}$ apresentaram valores de módulo aproximadamente 4,5% superiores aos dosados com $D_{\text{máx}} = 12,5 \text{ mm}$, o que vai ao encontro do estudo de Rohden (2011), que também concluiu que a dimensão máxima do agregado graúdo pouco influencia no módulo de elasticidade.

Figura 36 - Relação entre E_{cij} e f_{cmj} para diferentes classes de abatimento



Fonte: Autor.

Figura 37 - Relação entre E_{cij} e f_{cmj} para diferentes dimensões máximas dos agregados graúdos

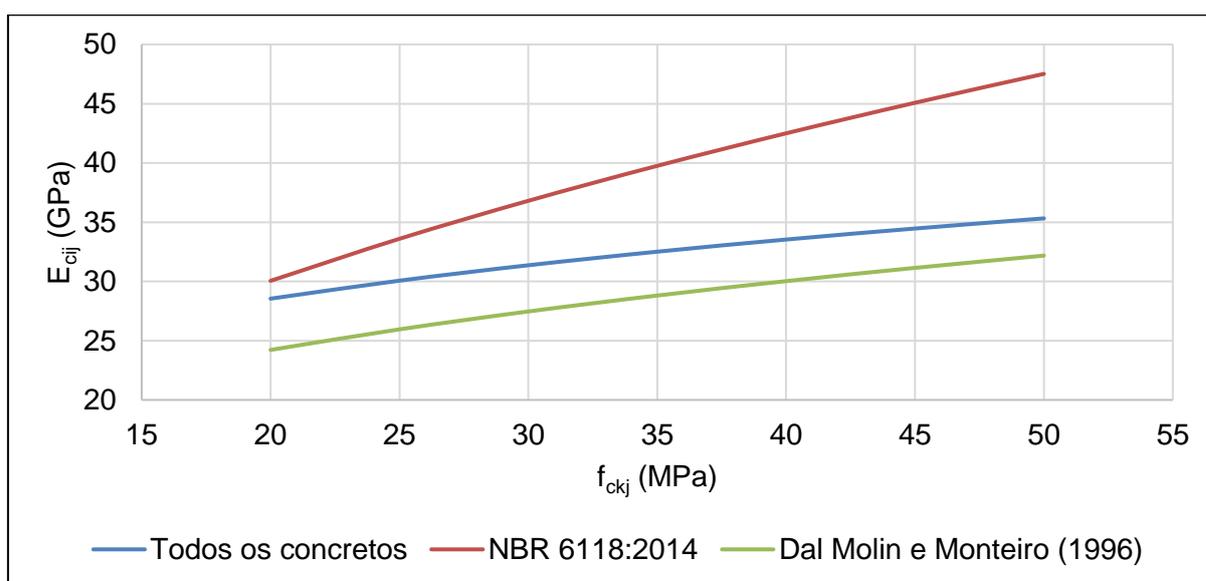


Fonte: Autor.

Como o comportamento das equações dos grupos não apresentaram diferenças significativas, foi adequada somente uma equação para todos os concretos dosados neste estudo (Eq. 23). Essa mesma equação foi adequada para f_{ckj} considerando o desvio-padrão de 4,0 MPa, conforme a NBR 12655:2015 (Eq. 24).

A Figura 36 apresenta o gráfico que compara a Equação 24 com a equação da NBR 6118:2014 com a correção de 20% de majoração por se tratar de basalto, e ainda, com a equação resultante do estudo de Dal Molin e Monteiro (1996) que também utilizaram basalto nos concretos estudados (Eq. 13).

Figura 38 - Comparação entre a equação ajustada com a NBR 6118:2014 e Dal Molin e Monteiro (1996)



Fonte: Autor.

É possível observar que nas resistências mais baixas, a NBR 6118:2014 apresenta valores semelhantes aos encontrados neste estudo, porém, com o aumento da resistência, a diferença torna-se cada vez maior, chegando a 25% para o f_{ck} 50 MPa. O estudo de Dal Molin e Monteiro (1996) apresenta resultados, em média, 12% menores do que o presente estudo, porém, o comportamento da equação é muito semelhante o que pode indicar que a equação da NBR 6118:2014 não apresenta o melhor ajuste para estimar o módulo de elasticidade através da resistência à compressão.

A Tabela 19 apresenta todas as equações ajustadas encontradas neste estudo.

Tabela 19 - Equações ajustadas aos dados experimentais

CONCRETOS	EQUAÇÃO	R ²	NÚMERO DA EQUAÇÃO
Grupo A	$E_{ci} = 10,327f_{cm}^{0,3058}$	0,96	15
Grupo B	$E_{ci} = 10,29f_{cm}^{0,3256}$	0,96	16
Grupo C	$E_{ci} = 10,468f_{cm}^{0,2993}$	0,89	17
Grupo D	$E_{ci} = 8,9873f_{cm}^{0,3382}$	0,96	18
S100	$E_{ci} = 10,388f_{cm}^{0,3028}$	0,93	19
S160	$E_{ci} = 9,5811f_{cm}^{0,3315}$	0,87	20
Dmáx = 19 mm	$E_{ci} = 10,263f_{cm}^{0,316}$	0,90	21
Dmáx = 12,5 mm	$E_{ci} = 9,6623f_{cm}^{0,32}$	0,92	22
Todos os concretos	$E_{ci} = 9,7512f_{cm}^{0,3245}$	0,89	23
Todos os concretos (fck)	$E_{ci} = 14,225f_{ck}^{0,2325}$	0,88	24

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Através da realização deste trabalho foi possível constatar que a classe de abatimento e a dimensão máxima característica do agregado graúdo não interferiu na evolução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos avaliados ao longo do tempo. O módulo de elasticidade apresentou maior evolução nas primeiras idades quando comparado à resistência à compressão, ao passo que após os 28 dias a situação se inverteu.

Os valores de módulo de elasticidade encontrados não apresentaram diferenças relevantes entre as classes de abatimento S100 e S160, nem entre as dimensões máximas características dos agregados graúdos de 19 mm e 12,5 mm.

Também foi possível identificar que a equação proposta pela NBR 6118:2014 para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial em função da resistência à compressão superestima os valores do módulo de elasticidade dos concretos estudados, apresentando uma diferença significativa para as resistências mais elevadas.

Segundo o estudo realizado, a equação 24 representa melhor a relação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos estudados, podendo ser utilizada para $3 \leq j \leq 28$ dias e $20 \leq f_{ck} \leq 50$ MPa.

$$E_{ci} = 14,225 f_{ck}^{0,2325} \quad (24)$$

Como continuidade para trabalhos futuros sugere-se realizar ensaios em concretos com outros tipos de agregados, cimentos e adições utilizados no estado do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

ALHADAS, Miguel F. S. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto.** Belo Horizonte: UFMG, 2008.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318:** Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills: ACI, 2014.

ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.** São Paulo: IBRACON, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11678:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BARBOSA, T. G.; GONÇALVES, E. V.; RIBEIRO, P. P.; SANTOS, T. V. I.; MAZZERO, R.; MARTH, S. D. **Desenvolvimento de concreto de alto desempenho em laboratório com o uso de agregados graúdos de diferentes jazidas expostos à diferentes tipos de cura**. São Paulo: IBRACON, 2008.

BRITISH STANDARD. **BS EN 12390-1**: Testing hardened concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds. London: BSI, 2000.

BRITISH STANDARD. **Eurocode 2**: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. London: BSI, 2004.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **FIP Model code**. Lausanne: CEB, 2010.

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.

DJANIKIAN FILHO, João Gaspar. Controle do módulo de elasticidade do concreto na estrutura com uso de célula de fluência. São Paulo: EPUSP, 2010.

HELENE, Paulo R. L. **Estudo da variação do módulo de elasticidade do concreto com a composição e característica do concreto fresco e endurecido**. São Paulo: PhD Engenharia, 1998.

HELENE, Paulo R. L.; ANDRADE, Nome. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. ed. G.C. Isaia. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

LI, Zongjin. **Advanced concrete technology**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

MARTINS, Danilo Gomes. **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**. Goiânia: UFG, 2008.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, J. M. Paulo. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO NETO, Antonio 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.

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

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEWMAN, John.; CHOO, Ban Seng. **Advanced concrete technology: concrete properties**. Oxford: Elsevier, 2003.

NUNES, Fábio W. G. **Avaliação da resistência e do módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

RAO, M. V. Krishna; KUMAR, P. Rathish; SRINIVAS, B. **Effect of size and shape of specimen on compressive strength of glass fiber reinforced concrete (GFRC)**. Facta universitatis. Architecture and Civil Engineering, 2011.

ROHDEN, Abrahão Bernardo. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

SHEHATA, L. D. **Concreto: ciência e tecnologia**. ed. G. C. Isaia. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

SHEHATA, L. D. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005.

TUTIKIAN, Bernardo F.; HELENE, Paulo R. L. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. São Paulo: IBRACON, 2012.