



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA DIMENSÃO  
MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO SOBRE O  
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

Rodrigo Nicolini Weizenmann

Lajeado, julho de 2017.



Rodrigo Nicolini Weizenmann

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA DIMENSÃO  
MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO SOBRE O  
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, na linha de formação específica em Engenharia Civil, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, julho de 2017.

Rodrigo Nicolini Weizenmann

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA DIMENSÃO  
MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO SOBRE O  
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO**

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. Me. Rafael Mascolo - orientador  
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. Antônio Pregeli Neto  
Centro Universitário UNIVATES

Prof. Me. Márlon Augusto Longhi  
Centro Universitário UNIVATES

Lajeado, julho de 2017.

## **AGRADECIMENTOS**

Acredito que a vida seja dividida em etapas. Cada uma delas com importâncias distintas e procedimentos para realizá-las que cada vez exigem mais de nós mesmos. Um trabalho de conclusão curso tem pelo próprio nome o último passo que temos que dar para alcançar a tão sonhada graduação. Enfim, aí estamos nós nos embalando para entrar em uma nova etapa de vida.

Pelo que podemos notar quando olhamos para trás em nosso caminho é que várias vezes cambaleamos, ficamos desanimados, chegamos ao ponto de querer largar tudo que conseguimos até aquele momento por se achar incapaz de superar os desafios que aparecem pela nossa caminhada. É nesses momentos que mãos amigas são estendidas e nos fazem notar tudo que somos e o quão capaz nos tornamos por ter conseguido superar os desafios antes enfrentados.

Gostaria de agradecer à minha família por sempre me oferecer o resguardo e me guiar pelas decisões que vim a tomar até o ponto em que me encontro agora. Sou incapaz de ressaltar o quanto me faz bem tê-los por perto e poder contar com o seu apoio sempre que preciso.

A minha namorada que sempre esteve ao meu lado, me acompanhando e apoiando em toda a graduação.

Sem dúvida, aos professores da instituição que me passaram todos os conhecimentos que detinham, para que agora possa exercer a carreira que pretendo seguir.

Ao professor mestre Rafael Mascolo que me orientou com grande empenho e dedicação, criando espaços de trocas de ideias que me instigavam a busca de novos conhecimentos e possibilidades aos segmentos deste trabalho.

Aos colegas do LATEC (Laboratório de Tecnologias de Construção) da Univates por auxiliarem na realização das atividades práticas realizadas.

Aos amigos e colegas de curso que em diversos momentos puderam me auxiliar a concluir a graduação

## RESUMO

O concreto é um dos materiais de construção mais utilizado em estruturas no país, sendo as propriedades físicas e mecânicas preponderantes para a aplicação e dimensionamento das estruturas atualmente elaboradas. A justificativa da presente pesquisa se dá devido à ausência de informações em normas vigentes sobre influência da variação da dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto. O objetivo do trabalho é analisar resultados de ensaios a partir de traços de concreto produzidos com agregados e dimensões de brita variáveis, para poder averiguar se esses parâmetros têm influência significativa nas propriedades mecânicas do material. A partir da dosagem em laboratório de concretos com agregado graúdo de natureza basáltica e granítica, varia-se a DMC do agregado em 9,5mm e 19mm e os teores de água/cimento entre os traços elaborados segundo o método de dosagem da ABCP. Para cada traço realizou-se ensaios nas idades de 3, 7, 28, 90 e 180 dias tanto de resistência à compressão como de módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios possibilitaram avaliar a influência que a DMC do agregado graúdo apresenta sobre o módulo de elasticidade do concreto bem como a influência dessa peculiaridade na resistência à compressão. Com a análise dos resultados não se pode verificar diferença significativa entre os valores encontrados de módulo de elasticidade variando-se as DMC, mas significativa ao se alterar a natureza do agregado. Além disso, é possível destacar uma discrepância no que diz respeito aos valores de módulo de elasticidade encontrados com os que a norma estima a partir da resistência à compressão, sendo que o ganho observado no módulo de elasticidade, com o aumento da resistência, foi muito menor do que previsto na literatura.

**Palavras-chave:** Concreto, Agregado graúdo, Dimensão máxima característica, Módulo de elasticidade.

## ABSTRACT

Concrete is one of the most used construction materials in the country, with its mechanical and physical properties being prevalent for application and design of current structures. The justification of this research is given to the lack of information in current specifications regarding the influence of the variation of maximum aggregate size (DMC) of coarse aggregate in the concrete elastic modulus. The goal of the research is to analyze test results from concrete batches produced with variable dimensions and types of aggregate, in order to investigate whether these parameters have significant influence on the mechanical properties of the material or not. From the dosage in concrete laboratory using coarse aggregates of basaltic and granitic natures, the maximum aggregate size was varied from 9,5mm to 19mm. Also, the water-cement ratio among mix designs were elaborated according to the ABCP dosage method. For each batch, compression and elastic modulus tests were made at the ages of 3, 7, 28, 90 and 180 days. With the test results, it was possible to evaluate the influence of the maximum aggregate size on the concrete elastic modulus, as well on the concrete's compressive strength. The analysis did not show any significant difference among the results by varying the DMC, but by varying the aggregate's nature. Also, there was a discrepancy between the elastic modulus values found and the ones estimated by the standards from the compressive strength values, as the gain observed in elastic modulus by increasing the compressive strength was much smaller than described in the specifications.

**Keywords:** Concrete. Coarse aggregate. Maximum aggregate size. Elastic modulus.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência da dimensão máxima do agregado na resistência aos 28 dias do concreto com diferentes teores de cimento.....	26
Figura 2 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.....	29
Figura 3 - Representação esquemática da relação tensão-deformação do concreto. .....	31
Figura 4 - Influência do módulo de elasticidade do agregado graúdo de 220 MPa no módulo de elasticidade do concreto. ....	32
Figura 5 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o abatimento ( $a/c = cte$ ).....	38
Figura 6 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o fator $a/c$ (abatimento = $cte$ )..	38
Figura 7 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o consumo de cimento ( $a/c = cte$ ). .....	39
Figura 8 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o consumo de cimento (abatimento = $cte$ ). ....	40
Figura 9 - Efeito da dimensão máxima característica da rocha no módulo de elasticidade do concreto.....	40
Figura 10 - Influência da DMC do agregado graúdo no módulo de elasticidade dos concretos de resistência moderada (CRM). ....	41
Figura 11 - Influência da DMC do agregado graúdo no módulo de elasticidade dos concretos de alta resistência (CAR). ....	42
Figura 12 - Influência da dimensão máxima e do tipo do agregado sobre o módulo de elasticidade do concreto.....	43

Figura 13 - Influência da dimensão máxima do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto.....	44
Figura 14 - Valores do Módulo estático de elasticidade em função da resistência à compressão em corpos-de-prova para diferentes dimensões máxima de agregado. ....	45
Figura 15 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (abatimento = cte). ....	46
Figura 16 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (a/c = cte). ....	46
Figura 17 - Efeito da resistência a compressão da rocha no módulo de elasticidade médio do concreto.....	47
Figura 18 - Influência da natureza do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto.....	48
Figura 19 - Efeito da idade sobre o módulo de elasticidade do concreto. ....	49
Figura 20 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados. ....	51
Figura 21 - Curva granulométrica da areia.....	54
Figura 22 - Curva granulométrica brita granito, DMC = 9,5mm.....	54
Figura 23 - Curva granulométrica brita basalto, DMC = 9,5mm. ....	55
Figura 24 - Curva granulométrica brita granito, DMC = 19mm.....	55
Figura 25 - Curva granulométrica brita basalto, DMC = 19mm. ....	55
Figura 26 – Histórico de carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão $\alpha_a$ fixa.....	58
Figura 27 - Extensômetros fixados no corpo de prova. ....	58
Figura 28 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B0-B.....	60
Figura 29 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B1-B.....	61
Figura 30 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B0-G. ....	61
Figura 31 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B1-G. ....	62
Figura 32 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita basalto com as duas DMC utilizadas. ....	63
Figura 33 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita granito com as duas DMC utilizadas. ....	63
Figura 34 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B0. ....	64

Figura 35 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B1. ....	64
Figura 36 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B0-B. ....	66
Figura 37 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B1-B. ....	66
Figura 38 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B0-G. ....	67
Figura 39 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B1-G. ....	67
Figura 40 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita basalto com as duas DMC utilizadas. ....	69
Figura 41 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita granito com as duas DMC utilizadas. ....	69
Figura 42 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B0. ....	70
Figura 43 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B1. ....	70
Figura 44 - Correlações entre $f_c$ e $E_{ci}$ com utilização da brita basalto. ....	72
Figura 45 - Correlações entre $f_c$ e $E_{ci}$ com utilização da brita granito. ....	73
Figura 46 - Análise múltipla de médias e desvio padrão das idades em relação ao módulo de elasticidade. ....	75
Figura 47 - Análise múltipla de médias e desvio padrão da dimensão do agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade. ....	76
Figura 48 - Análise múltipla de médias e desvio padrão do tipo de agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de cimento Portland comercializadas no Brasil. ....	20
Tabela 2 – Zona granulométrica ótima e utilizável, agregado miúdo. ....	23
Tabela 3 – Zona granulométrica ótima agregado graúdo. ....	23
Tabela 4 - Fator $\alpha E$ em relação ao tipo de agregado graúdo utilizado no concreto – NBR 6118. ....	33
Tabela 5 - Possíveis valores a serem obtidos dependendo da classe de resistência do concreto NBR 6118 (2014). ....	34

Tabela 6 - Coeficiente $\alpha 1$ em função do tipo de agregado graúdo do concreto – IBRACON (2003).....	34
Tabela 7 - Coeficiente $\alpha 2$ em função da consistência do concreto – IBRACON (2003). .....	35
Tabela 8 - Modelos de previsão de módulo de elasticidade tangente inicial para concretos normais, em função da resistência a compressão em MPa.....	37
Tabela 9 - Propriedades dos agregados a serem utilizados nas dosagens. ....	54
Tabela 10 - Traços unitários dosados. ....	56
Tabela 11: Resultados de resistência à compressão de todos os concretos. ....	60
Tabela 12: Resultados de módulo de elasticidade de todos os concretos. ....	65
Tabela 13: Análise de variância (ANOVA) para idade em relação ao módulo de elasticidade. ....	74
Tabela 14: Análise de variância (ANOVA) para tipo e dimensão de agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade. ....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI	American Concrete Institute
CAR	Concreto de alta resistência
cm <sup>2</sup>	Centímetros quadrados
cm	Centímetro
CRM	Concreto de resistência moderada
Cte	Constante
DMC	Dimensão máxima característica
E <sub>c</sub>	Módulo de elasticidade do concreto
E <sub>ci</sub>	Módulo de elasticidade inicial
E <sub>cs</sub>	Módulo de elasticidade secante
EPS	Poliestireno Expandido / Isopor
EVA	Ethil Vinil Acetat (Etileno Acetado de Vinila)
f <sub>c</sub>	Resistência à compressão do concreto
GPa	Gigapascal
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
Kg	Quilograma
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira
µm	Micrometro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1. Justificativa e relevância da pesquisa.....	17
1.2. Objetivo geral .....	17
1.3. Objetivos específicos.....	17
1.4. Delimitação do trabalho.....	18
1.5. Estrutura do trabalho .....	18
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
2.1. Cimento Portland .....	19
2.2. Agregados para Concreto .....	20
2.2.1. Distribuição granulométrica .....	21
2.2.2. Forma dos grãos do agregado graúdo.....	24
2.2.3. Dimensão máxima do agregado graúdo.....	25
2.3. Concreto.....	27
2.4. Propriedades do concreto endurecido.....	28
2.4.1. Resistência a compressão.....	28
2.4.2. Módulo de elasticidade do concreto.....	29
2.4.3. Fatores que afetam as propriedades do concreto endurecido.....	37
2.4.3.1. Relação água/cimento.....	37
2.4.3.2. Consumo de cimento .....	39
2.4.3.3. Dimensão máxima do agregado .....	40
2.4.3.4. Teor do agregado graúdo .....	45
2.4.3.5. Resistência do agregado .....	46
2.4.3.6. Natureza do agregado.....	47
2.4.4. Fatores que afetam a determinação das propriedades do concreto .....	48
2.4.4.1. Idade .....	48
2.4.4.2. Condições de cura .....	49
2.4.4.3. Parâmetros de ensaio .....	50
2.4.4.4. Umidade do corpo de prova .....	50
2.4.4.5. Velocidade do carregamento .....	50

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1. Materiais.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.1. Ensaio propostos para os agregados .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.2. Ensaio propostos para o cimento .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2. Métodos.....</b>	<b>56</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1. Resistência à compressão.....</b>	<b>59</b>
<b>4.2. Módulo de elasticidade .....</b>	<b>65</b>
<b>4.3. Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto. ....</b>	<b>71</b>
<b>4.4. Análise de variância .....</b>	<b>74</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais da construção civil mais utilizado em todo o mundo. O seu emprego nos mais diferentes tipos de concepções estruturais ocorre devido a sua capacidade em se adaptar facilmente as formas pretendidas e proporcionar uma resistência adequada aos esforços resultantes das cargas impostas à estrutura.

Para a construção de estruturas que utilizam concreto, é necessário adaptar as propriedades do material ao elemento em que será inserido. Os métodos de dosagem se diversificam cada vez mais para que ocorra a melhor adaptação do concreto com os materiais disponíveis na região em que ocorre as construções, tornando o material formado após a mistura, adequado as necessidades daquela região (ALHADAS, 2008).

Ao contrário do que era formado o concreto convencional, produzido apenas com cimento, areia, brita e água, a mistura hoje recebe quase que obrigatoriamente a adição de aditivos que melhoram o desempenho sem prejudicar as características mecânicas após endurecido (WEIDMANN, 2008). No que diz respeito aos materiais inertes do produto, como a areia e a brita, as adaptações às necessidades da obra trazem ao concreto materiais diversificados como resíduos da construção civil, agregados leves, como o EVA e o EPS, fibras, entre outros. Visando diminuir o peso próprio do concreto ou melhorar as propriedades nos estados fresco e endurecido, esses materiais podem melhorar características mecânicas ou até mesmo contribuir com o meio ambiente por ser uma maneira de reaproveitar resíduos gerados em outras atividades.

Atualmente a demanda por projetos mais arrojados exige estruturas cada vez mais esbeltas, vencendo maiores vãos e suportando cargas elevadas, o que torna imprescindível que seja realizado um controle tecnológico do que é empregado na construção de modo a comparar com o projetado. Ao passar do tempo a modernização dos empreendimentos incorpora as construtoras uma elevada pressão no que diz respeito a tempo e segurança dos projetos elaborados (NEVILLE, 2013).

Principalmente os concretos empregados nas edificações devem receber um devido controle tecnológico para que se conheçam as características do material que está sendo empregado nos elementos. Desta forma, o concreto além de ser analisado por testemunhos das cargas entregues, deve ser rastreado na obra para que se tenha a certeza sobre qual elemento possa estar debilitado com um material que não atenderá aos requisitos mínimos da estrutura (CUNHA, 2000).

A resistência a compressão é considerada por muitos como o controle tecnológico fundamental no concreto, deixando de lado os demais ensaios que podem requerer uma atenção maior ao projetista (NEVILLE, 2013). A resistência a compressão do concreto serve de avaliação indireta para determinação de outras propriedades do material. Porém, muitas vezes podem haver simplificações que não caracterizam com precisão determinadas características, é por isso que se torna imprescindível um conhecimento mais aprofundado dessas, tais como o módulo de elasticidade.

O módulo de elasticidade do concreto muitas vezes é desconsiderado, levando a desformas precoces da estrutura. Em diversas obras, para que se realize as desformas antecipadas das peças, é levado em conta simplesmente a resistência a compressão do concreto, deixando de lado o módulo de elasticidade do material. Sabendo que as duas propriedades não evoluem da mesma maneira com o tempo (MEHTA; MONTEIRO, 2014), a retirada precoce dos escoramentos pode resultar em flechas excessivas dos elementos, causando desconforto aos usuários e possíveis dificuldades na realização de etapas subsequentes, tais como sistemas de revestimentos, de aberturas e etc.

### **1.1. Justificativa e relevância da pesquisa**

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) o cálculo do módulo de elasticidade do concreto, levando em conta a resistência a compressão do material, deve ser multiplicado por um determinado fator que considera a influência do tipo de agregado graúdo utilizado na mistura. Porém, a norma não especifica fator de correção ao resultado obtido na correlação levando em conta a dimensão máxima característica do agregado graúdo, considerando dessa forma, não haver diferença expressiva devido a essa propriedade.

Caso tais valores estimados de módulo de elasticidade variem consideravelmente em relação a dimensão do agregado graúdo, os cálculos indicados pela norma podem não demonstrar o que realmente a estrutura está sujeita a deformar, exercendo um fator de risco ao dimensionamento e prejudicando parâmetros de conforto aos usuários.

### **1.2. Objetivo geral**

O objetivo principal é avaliar a influência do tipo e da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto, considerando diferentes relações a/c e resistências mecânicas na dosagem das misturas.

### **1.3. Objetivos específicos**

- a) realizar diferentes dosagens de concreto com variações na relação água/cimento (ou na resistência à compressão), tipo e dimensão máxima característica do agregado graúdo;
- b) analisar as propriedades mecânicas das diferentes dosagens dos concretos realizados;

- c) comparar os valores propostos pela literatura no que diz respeito ao módulo de elasticidade, estimado a partir da resistência a compressão dos concretos de cada dosagem;

#### **1.4. Delimitação do trabalho**

Este estudo está limitado aos agregados disponíveis na região central do Rio Grande do Sul especificamente no que diz respeito a mineralogia do agregado utilizado, basalto e granito. O cimento utilizado para a produção dos traços será o CPV-ARI RS que melhor se adaptou aos testes realizados.

#### **1.5. Estrutura do trabalho**

No primeiro capítulo do trabalho encontra-se a introdução, a qual trata-se de uma breve apresentação de todos os outros capítulos que serão descritos mais detalhadamente no decorrer do trabalho. Também se encontram os objetivos gerais e específicos, as justificativas e as delimitações do trabalho proposto. A revisão bibliográfica dos conceitos abordados encontra-se no segundo capítulo, informando sobre o concreto, sua composição, características, propriedades, e sobre os fatores que afetam a obtenção dos parâmetros a serem determinados.

O terceiro capítulo é composto por uma explicação generalizada dos materiais que foram escolhidos para serem estudados e utilizados nos ensaios, bem como os métodos para determinação das características do concreto. O quarto capítulo se atém a expor os resultados e discuti-los levando em consideração o que prescreve as normativas e analisar a influência sobre o módulo de elasticidade do concreto que o agregado graúdo apresenta, bem como expor as propriedades mecânicas encontradas a partir dos ensaios realizados. Por fim, no quinto capítulo consta a conclusão do presente trabalho, relevando o objetivo da monografia e propondo pesquisas que possam agregar conhecimentos relacionados ao do presente estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa tem o objetivo de apontar referências coletadas por meio de pesquisa bibliográfica, trazendo melhor assimilação e concepção das características dos materiais empregados na mistura e dos fatores que implicam na alteração das propriedades mecânicas do concreto.

### 2.1. Cimento Portland

Cimentos são substâncias ligantes dos materiais constituintes de um produto formado por diferentes tamanhos de grãos que formam após a mistura um único corpo compacto (KIHARA; CENTURIONE, 2005). O cimento Portland, dentre os ligantes existentes, é a variação mais utilizada na construção civil que misturada com agregados, e em contato com a água, entra em processo de hidratação e endurecimento. A definição desse tipo de cimento foi conceituada por Mehta e Monteiro (2014) como:

[...] um cimento hidráulico produzido pela pulverização de clínqueres constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos cristalinos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e até 5% de calcário como adição na moagem. Clínqueres são nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado que é produzido quando uma mistura de matérias-primas com proporcionamento adequado é aquecida sob altas temperaturas[...].

Kihara e Centurione (2005) destacam que, além de clínqueres, o cimento possui outros materiais constituintes que são empregados na produção devido a diversas vantagens que influenciam em seu desempenho. Entre estes materiais os que merecem maior destaque são a escória e o gesso, esse utilizado para retardar a pega instantânea do cimento ao contato com a água e aquele utilizado como opção

de substituição do clínquer em pequena escala, além de incrementar a resistência do concreto a sulfatos.

Atualmente, a comercialização de cimento Portland é realizada em cinco diferentes classes no Brasil, sendo essas variando de acordo com a composição. A tabela 1 apresenta a constituição e a nomenclatura utilizada para cada uma das classes bem como as variações que ocorrem em cada uma delas.

Tabela 1 – Classes de cimento Portland comercializadas no Brasil.

Cimento Portland (ABNT)	Tipo	Clínquer + Gesso (%)	Escória siderúrgica (%)	Material pozolânico (%)	Calcário (%)
CP I	Comum	100	-	-	-
CP I - S	Comum	95-99	1-5	1-5	1-5
CP II - E	Composto	56-94	6-34	-	0-10
CP II - Z	Composto	76-94	-	6-14	0-10
CP II - F	Composto	90-94	-	-	6-10
CP III	Alto-forno	25-65	35-70	-	0-5
CP IV	Pozolânico	45-85	-	15-50	0-5
CP V - ARI	Alta resistência inicial	95-100	-	-	0-5

Fonte: Salgado, 2015.

## 2.2. Agregados para Concreto

Os agregados representam funções essenciais para a maioria das propriedades que são atribuídas ao concreto, sejam elas trabalhabilidade, acabamento ou exsudação no estado fresco, e até mesmo no caso da massa endurecida, na resistência e módulo de elasticidade. Segundo Guimarães et. al (1999) os agregados são fragmentos de materiais que não apresentam reações químicas expressivas em contato com a água e são usados junto a um meio cimentante para, no caso do ligante ser cimento Portland, formar os concretos e argamassas. Algumas características que podem ser analisadas desses materiais são a forma, granulometria, dimensão máxima característica (DMC), distinção da mineralogia do agregado gráudo e módulo de finura.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2011) especifica os parâmetros considerados adequados para a utilização dos agregados, tanto miúdos como graúdos, destinados a produção de concreto de cimento Portland. Para a maioria das dosagens existentes, algumas características desses materiais são exigidas como parâmetros de cálculo da proporção de cada um que será utilizado na mistura. Além disso, a mesma norma classifica como agregados graúdos os fragmentos de tamanho maior que 4,8mm, e como agregados miúdos os que ficam compreendidos na faixa entre 75 µm e 4,8mm.

No Brasil a pedra britada é o agregado mais usado para a produção de concreto principalmente nos grandes centros onde a obtenção dos materiais no estado natural se torna inviável. As rochas britadas mais utilizadas para produção de agregados graúdos são as basálticas e as graníticas (GUIMARÃES et. al, 1999).

Neville (2013) ressalta que  $\frac{3}{4}$  do volume do concreto são ocupados por agregados, fazendo com que se espere uma qualidade significativa desses materiais. As propriedades dos agregados afetam diretamente a durabilidade e o desempenho estrutural do concreto, além de limitar a resistência que se pode atingir com uma dosagem, pois ocorre a ruptura direta da rocha antes mesmo de aparecerem constatações de rompimento na pasta. O autor destaca também que do ponto de vista econômico a produção do concreto visa utilizar o teor máximo de agregados juntamente com a menor quantidade de cimento possível, porém a relação custo/benefício deve ser levada em conta no momento em que são estabelecidas as propriedades desejadas no estado fresco e endurecido.

### **2.2.1. Distribuição granulométrica**

A resistência à compressão de um concreto convencional adensado de forma adequada, ou seja, sem apresentar bolhas de ar no elemento, é diretamente relacionada a relação água/aglomerante da mistura. A relação água/aglomerante do concreto é parcialmente dependente da granulometria do agregado pois há uma relação direta entre granulometria e trabalhabilidade. Para se obter uma resistência correspondente a relação água/aglomerante escolhida o adensamento pleno do material se faz necessário, gerando assim uma correlação entre distribuição granulométrica e resistência do concreto (NEVILLE, 2013). Para se obter o melhor

empacotamento das partículas é necessário agregados com granulometria contínua, pois vazios gerados por partículas do mesmo tamanho só podem ser preenchidos por grãos de tamanho inferior, suficientemente pequenos para o espaço gerado.

Se tratando disso Mehta e Monteiro (2014) destacam que agregados de granulometria descontínua (que apresentam grande deficiência ou excesso de alguma dimensão de partícula) produzem misturas de concreto menos trabalháveis. Para os autores, a granulometria tem influência na trabalhabilidade do concreto, no seu custo, e no consumo de materiais. Areias grossas por exemplo podem apresentar superfícies ásperas no produto, no entanto se muito fina podem elevar o consumo de água da mistura devido ao aumento da área superficial dos grãos.

Se tem como padronizado a utilização de agregado graúdo em maior quantidade por metro cúbico de concreto. Esta premissa tem um caráter econômico pois seu custo é muito menor do que o do aglomerante. Pode se levar em conta o processo de adensamento, pois concretos auto adensáveis, que tem seu peso próprio responsável pelo adensamento, ou mesmo em concretos com o abatimento muito alto (200 mm) as granulometrias contínuas são mais utilizadas. Porém, quando se dispõe de alta energia vibratória e baixos valores de abatimento, curvas granulométricas descontínuas são utilizadas em maior escala (NEVILLE, 2013).

Para que ocorra uma padronização da distribuição granulométrica dos agregados utilizáveis para a produção de concreto a NBR 7211 (ABNT, 2011) especifica uma distribuição utilizável e outra ótima. Segundo a norma o agregado miúdo passa na peneira de 4,75 mm e fica retido na peneira com abertura de 150 um, e o agregado graúdo é o que passa na peneira de 75 mm e fica retido na peneira de 4,75 mm.

Os agregados miúdos a serem utilizados no concreto devem ter sua faixa granulométrica compreendida preferencialmente na zona ótima e excepcionalmente na zona utilizável não dispersando destas, conforme específica a tabela 2:

Tabela 2 – Zona granulométrica ótima e utilizável, agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 um	15	35	55	70
300 um	50	65	85	95
150 um	85	90	95	100

Fonte: ABNT NBR 7211:2011.

Os agregados graúdos a serem utilizados no concreto devem ter sua faixa granulométrica compreendida preferencialmente na zona discriminada não dispersando desta, conforme específica a tabela 3:

Tabela 3 – Zona granulométrica ótima agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona granulométrica $d/D^{1)}$				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0-5
63 mm	-	-	-	-	5-30
50 mm	-	-	-	0-5	75-100
37,5 mm	-	-	-	5-30	90-100
31,5 mm	-	-	0-5	75-100	95-100
25 mm	-	0-5	5-25 <sup>2)</sup>	87-100	-
19 mm	-	2-15 <sup>2)</sup>	65 <sup>2)</sup> -95	95-100	-
12,5 mm	0-5	40 <sup>2)</sup> -65 <sup>2)</sup>	92-100	-	-
9,5 mm	2-15 <sup>2)</sup>	80-100	95-100	-	-
6,3 mm	40-65 <sup>2)</sup>	92-100	-	-	-
4,75 mm	80 <sup>2)</sup> -100	95-100	-	-	-
2,36 mm	95-100	-	-	-	-

<sup>1)</sup> Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo.

<sup>2)</sup> Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ABNT NBR 7211:2011.

### 2.2.2. Forma dos grãos do agregado graúdo

As rochas normalmente são constituídas de vários minerais diferentes que são formados por cristais com estrutura e resistência variadas dependendo de como a rocha foi formada alterando o tamanho dos cristais internos. Ao ser britada, a quebra da rocha ocorre na interface entre os cristais por serem estes pontos em que a coesão é mais fraca. Uma rocha sendo resistente e homogênea dificulta a obtenção de forma cúbica propiciando a quebra por moagem em lamelas (ROHDEN, 2015).

A forma dos agregados diz respeito às características geométricas das partículas, podendo ser classificados como arredondados, angulosos, alongados ou achatados (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A forma dos grãos juntamente com a textura superficial dos mesmos influencia as propriedades do concreto no estado fresco e no estado endurecido. Quanto mais ásperas e angulosas as partículas, mais água na mistura será exigida para a mesma trabalhabilidade, aumentando assim o custo do concreto. Este maior volume de pasta é necessário tanto para envolver a maior área específica dos grãos quanto para compensar dificuldades no rolamento dessas partículas (WEIDMANN, 2008).

Partículas alongadas lamelares ou em forma de discos produzem concretos ásperos e por isso devem ser evitados ou limitados a no máximo 15% da massa total de agregados. Ao serem utilizados agregados graúdos lamelares ocorre a acomodação em direções preferenciais gerando alinhamentos que propiciam planos de fraqueza levando a ruptura (NEVILLE, 2013). Em contrapartida os agregados cúbicos ou esféricos resultam em um aumento da trabalhabilidade.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2011), adota o índice de forma como parâmetro para a utilização do agregado no concreto. Segundo a norma, tal índice não deve ser superior a três, quando determinado de acordo com o que estipula a NBR 7809 (ABNT, 2006). O método de ensaio consiste da análise de 200 partículas do agregado relacionando o comprimento e a espessura de cada uma delas.

Pode-se dizer que, de maneira geral, quanto mais esféricas forem as partículas do agregado mais trabalhável será a mistura no qual este agregado é inserido, mantendo-se as demais proporções da mistura e dos materiais. O efeito é

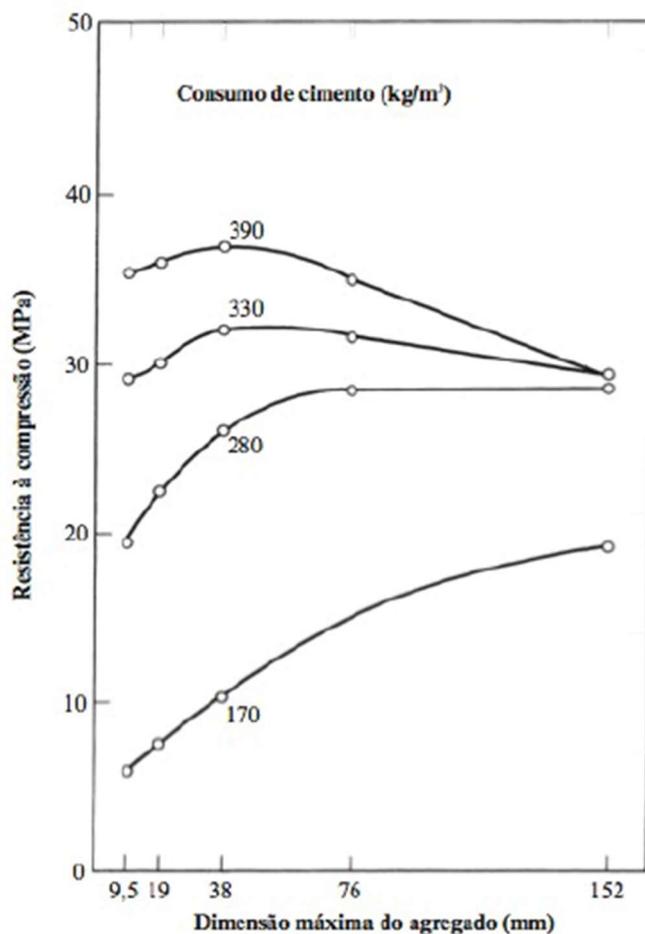
devido as propriedades da esfera, do rolamento, e da área superficial que é a menor comparada as outras formas geométricas de mesma massa. Desta forma quanto mais esférica as partículas de um agregado, menor argamassa será necessária para revesti-la e preencher os vazios formados entre elas, sobrando mais argamassa para contribuir com a fluidez da mistura (CASTRO, 2007).

### **2.2.3. Dimensão máxima do agregado graúdo**

É conhecido que quanto maior o tamanho do agregado, menor será a área superficial a ser molhada por unidade de massa da amostra. Desta forma, caso se eleve a granulometria do agregado é de se esperar que a demanda de água da mistura seja reduzida, conseqüentemente reduzindo a relação água/cimento e aumentando a resistência do concreto. Porém existe um máximo para se elevar a dimensão do agregado além do qual a diminuição da água na mistura provoca uma menor superfície de aderência e aumenta as descontinuidades na massa, tornando assim o concreto heterogêneo e de baixa resistência (NEVILLE, 2013).

Na figura 1, pode-se notar que com uma elevação da dimensão do agregado na mistura ocorre um aumento da resistência, porém se levado a maiores dimensões a resistência a compressão começa a diminuir tornando pouco atrativo a utilização de materiais de dimensões tão elevadas. As curvas de ganho de resistência têm uma considerável elevação até agregados com dimensão máxima de 40mm para concretos que consomem mais de  $280\text{kg/m}^3$ , porém a partir disso a perda de resistência aos 28 dias é muito significativa e se eleva cada vez mais juntamente com a dimensão máxima característica (DMC). Em concretos convencionais utilizados em estruturas a dimensão máxima utilizada fica por volta de 19mm ou 40mm pois deve passar com facilidade pelas seções dos elementos e espaçamento entre as armaduras (NEVILLE, 2013).

Figura 1 - Influência da dimensão máxima do agregado na resistência aos 28 dias do concreto com diferentes teores de cimento.



Fonte: Neville (2013).

A necessidade de alteração da dimensão do agregado inicialmente é por questão de trabalhabilidade e custo na obra. Desta forma, procura-se adequar ambos para a escolha do agregado graúdo. A dimensão máxima do agregado graúdo é limitada ainda pelo espaçamento entre as barras de aço na estrutura, como regra geral deve ser menor que  $1/5$  da dimensão mais estreita da forma onde o concreto será colocado e  $3/4$  da menor distância livre entre as armaduras de aço (BORBOSA, 1999).

### 2.3. Concreto

Na concepção de estruturas a utilização do concreto como material constituinte é cada vez mais aprimorada. A busca por tornar as construções elementos cada vez mais esbeltos e dependentes de poucos pontos de sustentação, para que se consiga a obtenção de grandes vãos e conseqüentemente aumentando a área passível de utilização da edificação, requer materiais que possuam características compatíveis as exigências de projeto designadas à cada elemento constituinte da edificação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

É nesse quesito que a produção de concreto vem sendo aprimorada à medida que os construtores necessitam do material com determinadas características em períodos menores de tempo a ou níveis de esforços mecânicos superiores àqueles que as centrais dosadoras estão acostumadas a produzir. Por ser um produto resultante da mistura de diferentes componentes e sabendo que tais constituintes influem nas características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, diversos métodos de dosagem surgiram com o passar do tempo, visto que principalmente os agregados, mas também os demais materiais que compõem as dosagens, quando provenientes de regiões diferentes alteram as propriedades da mistura dependendo de suas peculiaridades (VIEIRA, 2008).

Após realizar as devidas dosagens que se adéquam aos parâmetros necessários solicitados e também ao custo por metro cúbico para tornar o produto com capacidade de concorrer com os demais no mercado, é necessária a reprodução do traço em grande escala. Diversas vezes se posicionam quesitos contrários ao que cada envolvido no processo de descarga atribui à um concreto adequado para utilização na construção. Conflitos principalmente no que diz respeito a trabalhabilidade necessária para o adensamento podem, se corrigidos com água, afetar as propriedades finais, devido a alteração da dosagem (ROHDEN, 2011).

O controle adequado, tornando garantido o que se estimou por dosagens em pequena escala, garante com que características como resistência a compressão e o módulo de elasticidade, parâmetro esse cada vez mais necessário em obras com grandes dimensões, atinjam os valores estipulados em experimentos laboratoriais (NEVILLE, 2013).

Ao se observar o todo pode-se distinguir a importância do concreto industrializado do concreto produzido em obra. Com baixo controle de materiais e as eminentes patologias geradas por concretos produzidos no canteiro de obra, o incentivo a compra de um produto com procedência ganha ênfase no cotidiano até mesmo de pequenas construções, possibilitando o aprimoramento de técnicas de dosagem que atendam às necessidades do mercado (GUIMARÃES et al., 1999)

## **2.4. Propriedades do concreto endurecido**

### **2.4.1. Resistência a compressão**

O concreto tem sua resistência à compressão definida pelo ensaio em corpos de prova que são sujeitos a forças axiais até o rompimento. Os ensaios são realizados em prensas, normalmente hidráulicas e computadorizadas, que indicam a carga máxima suportada.

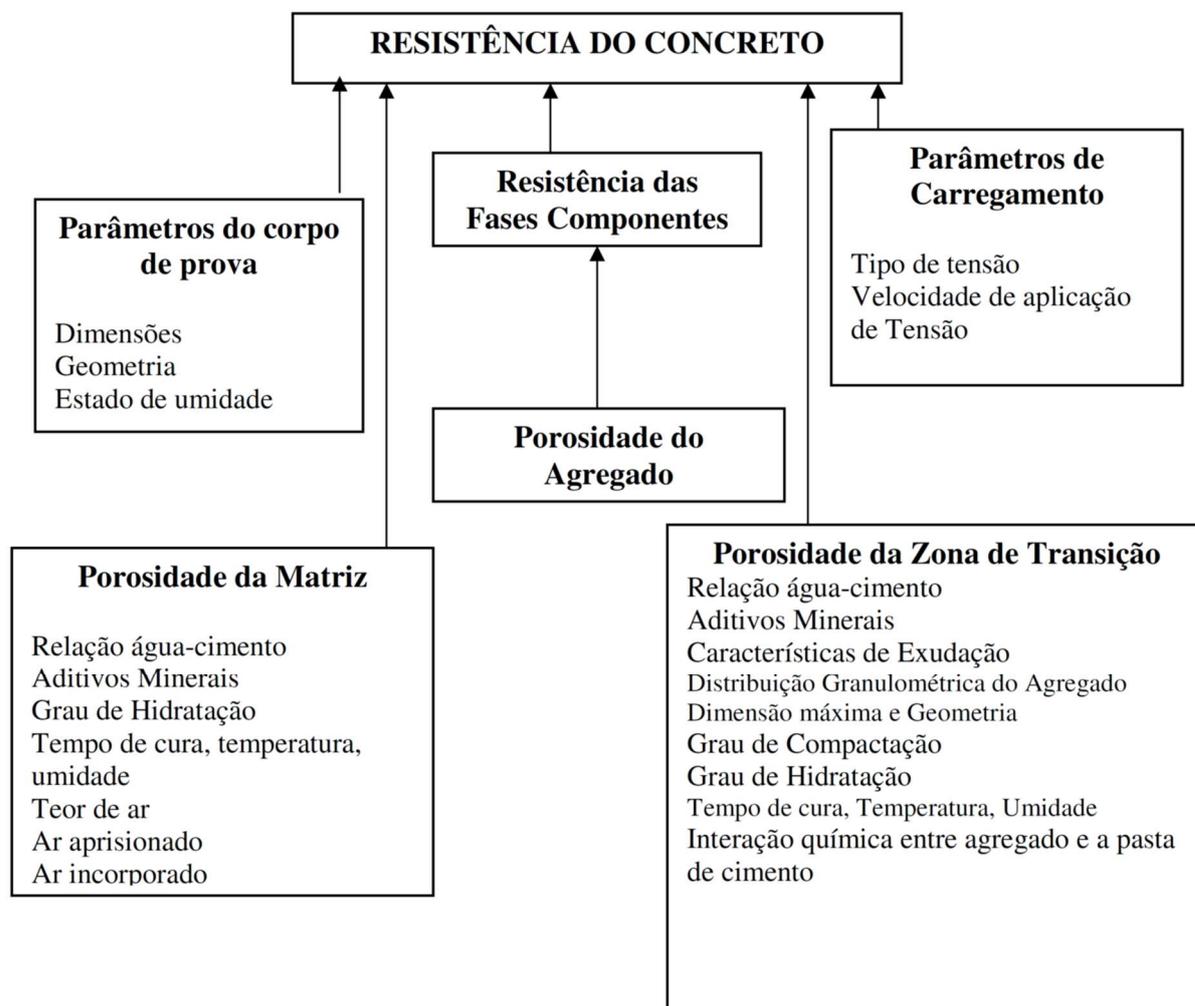
Mehta e Monteiro (2014) afirma que:

“No projeto e controle de qualidade do concreto, a resistência é uma propriedade normalmente especificada, porque, comparado aos ensaios envolvendo outras propriedades, o ensaio de resistência é relativamente fácil. Além disso, acredita-se que muitas propriedades do concreto, como módulo de elasticidade, estanqueidade ou impermeabilidade, e resistência a intempéries, incluindo águas agressivas, estão ligadas à resistência e, por isso, podem ser deduzidas a partir de dados da resistência.” (pg. 52).

Pacheco (2006), lembra que a resistência a compressão do concreto é a propriedade mecânica mais conhecida entre os atuantes no ramo das construções, porém, muitas vezes é utilizada isoladamente em estruturas de concreto armado. Quando a resistência a compressão é atendida, libera-se precipitadamente, as lajes e vigas para desforma não levando em conta os valores de módulo de elasticidade nem a resistência a tração do concreto, deixando as estruturas a mercê de deformações e flechas elevadas.

Mehta e Monteiro (2014) citam que vários fatores podem ser relevantes para que ocorra uma variação na resistência do concreto, pode-se observar na figura 2 tais fatores.

Figura 2 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014), pg 69.

#### 2.4.2. Módulo de elasticidade do concreto

Para qualquer tensão existe uma deformação e vice-versa. O concreto é, até certo ponto, elástico devido a trechos de carregamento onde ocorre deformação que, após retirada, a carga volta ao ponto inicial desaparecendo a deformação gerada. Por sua vez o concreto apresenta fluência, aumento da deformação com o tempo, se submetido a carga pequenas por longo período (NEVILLE, 2013).

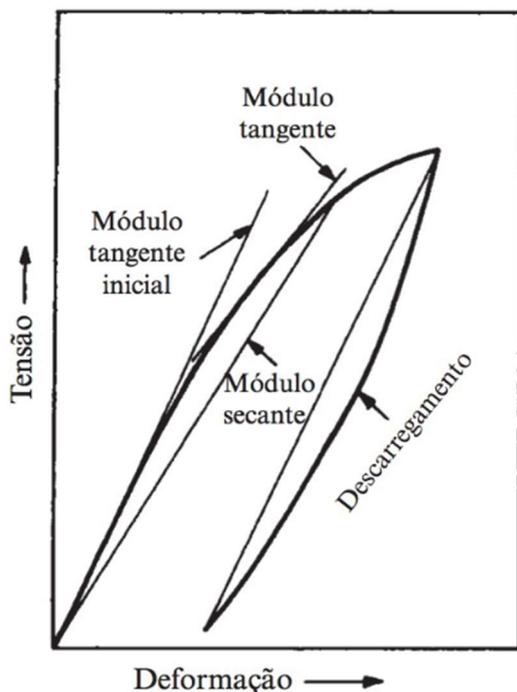
A figura 3 representa a relação tensão-deformação de um corpo de prova de concreto carregado e descarregado por compressão axial a uma tensão bem menor do que a resistência final. Para que seja possível seguir a expressão do módulo de

elasticidade de Young ( $E = \text{tensão}/\text{deformação}$ ) na íntegra somente pode-se utilizar a parte reta da curva tensão-deformação, ou caso não se tenha um trecho retilíneo a tangente da curva de origem é utilizável. A importância prática do módulo de elasticidade tangente inicial, assim conhecido, é limitada, pois se restringe somente a variações muito pequenas de carregamento próximas do ponto onde se quer determinar o módulo tangente (NEVILLE, 2013).

O aumento da deformação enquanto a carga, ou parte dela, atua, ocorre devido a fluência do concreto, porém como a deformação imediata é diretamente dependente da velocidade do carregamento podendo tornar o gráfico tensão-deformação com curvaturas reduzidas aplicáveis ao cálculo de módulo de Young, se torna difícil distinguir se a deformação ocorre de forma elástica ou devido a fluência. Para que se pudesse dividir as duas arbitrariamente se considera que: a deformação ocorrida durante o carregamento é considerada elástica e o aumento da deformação após a carga é atribuído a fluência. Tal módulo de elasticidade que atende esse requisito é o módulo secante da figura 3, considerado como módulo estático pois é determinado a partir da curva tensão-deformação em corpos de prova cilíndricos obtida experimentalmente (NEVILLE, 2013).

Mehta e Monteiro (2014), afirmam que mesmo com tantos fatores influentes, o módulo de elasticidade do concreto se mantém entre 20 e 30 GPa para a maioria dos concretos produzidos. Com resistências um pouco maior ocorre o mesmo, isso porque a matriz da pasta de cimento ainda apresenta porosidade, o que propicia a deformação devido aos vazios intersticiais.

Figura 3 - Representação esquemática da relação tensão-deformação do concreto.



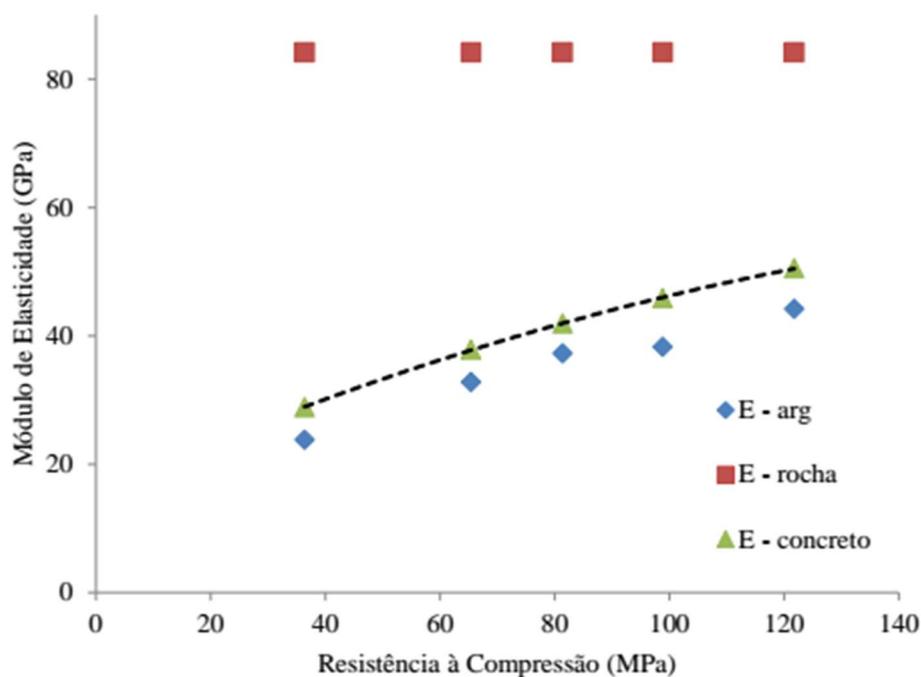
Fonte: Neville, 2013.

O módulo secante diminui com o aumento de tensão, devendo assim ser sempre citada a tensão em que foi obtido. Para que se possibilite isso as normas fixam valores proporcionais para a obtenção do módulo secante. A NBR 8522 (ABNT, 2008) estabelece a tensão de ensaio em 30% da resistência estimada ao corpo de prova para realização das leituras de deformação (NEVILLE, 2013).

Para Mehta e Monteiro (2014) não há dúvidas de que o módulo de elasticidade aumente conforme o aumento da resistência à compressão do concreto, porém ainda não existe concordância sobre a forma exata dessa relação. Tudo que se pode afirmar, conforme o autor, é que o aumento do módulo de elasticidade do concreto é progressivamente menor que o aumento da resistência a compressão. Tal discrepância de estimativas é correlacionada a influência que o módulo de elasticidade e o teor do agregado tem sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Rohden (2015) após realizar ensaios de módulo de elasticidade na argamassa, na rocha e no concreto formado pela mistura dos dois anteriores, propôs que o módulo de elasticidade do concreto é uma ponderação entre o módulo de elasticidade da rocha e o módulo da argamassa, conforme demonstra a figura 4.

Figura 4 - Influência do módulo de elasticidade do agregado graúdo de 220 MPa no módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Rohden, 2015.

### **Correlações matemáticas e proposições sobre o valor do módulo de elasticidade do concreto.**

Normalmente o ensaio de módulo de elasticidade do concreto não é realizado devido à falta de conhecimento da possibilidade de obtenção do parâmetro pelos laboratórios. Soma-se ainda, os valores elevados que o ensaio, comparado com o de resistência a compressão, apresenta, ou até mesmo a mentalidade de que o parâmetro não é importante para o dimensionamento (ALHADAS, 2008).

Sem dúvida o valor do módulo de elasticidade é um parâmetro necessário e pelo menos deve ser estimado de alguma forma, correlacionando outros parâmetros ou características que apresenta o material. Existem, segundo Pacheco (2006), dois possíveis modelos a serem utilizados, os teóricos e os empíricos, para correlacionar propriedades. Os modelos teóricos agregam ao módulo de elasticidade do concreto às propriedades reológicas, além das proporções dos materiais na mistura, os empíricos associam o módulo de elasticidade com a resistência à compressão.

Para Cunha (2000) a maioria das normas internacionais realizam a previsão do módulo de elasticidade a partir da resistência a compressão determinados por ensaios usuais. Porém essa relação estrita, considera, quando muito, o tipo do agregado, e despreza outros fatores influenciadores como teor de agregado, tipo do cimento e outros.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto pode ser estimado, aos 28 dias de idade, utilizando a Equação 1 para resistências características entre 20 MPa e 50 MPa e a Equação 2 para resistências de 55 MPa até 90 MPa.

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left( \frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (2)$$

Em que  $E_{ci}$  é o módulo de elasticidade tangente inicial (MPa),  $f_{ck}$  é a resistência a compressão característica do concreto (MPa) e  $\alpha_E$  é um fator de correção que leva em conta o tipo de agregado utilizado na mistura, conforme tabela 4.

Tabela 4 - Fator  $\alpha_E$  em relação ao tipo de agregado graúdo utilizado no concreto – NBR 6118.

Tipo de agregado	$\alpha_E$
Basalto e diabásio	1,2
Granito e gnaisse	1,0
Calcário	0,9
Arenito	0,7

Fonte: adaptado pelo autor de NBR 6118 (ABNT, 2014).

A norma ainda expõe possíveis valores a serem encontrados dependendo da classe do concreto, esses valores são estimados a partir de concretos produzidos com pedra granito, conforme tabela 5:

Tabela 5 - Possíveis valores a serem obtidos dependendo da classe de resistência do concreto NBR 6118 (2014).

Classe de resistência	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C60	C70	C80	C90
Eci (GPa)	25	28	31	33	35	38	40	42	43	45	47
Ecs (GPa)	21	24	27	29	32	34	37	40	42	45	47

Fonte: adaptado pelo autor da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Segundo o Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON (2003) é possível calcular o módulo de elasticidade inicial de concretos entre 15MPa e 50MPa, segundo a Equação 3:

$$E_{ci} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

Sendo  $f_{ck}$  a resistência característica do concreto e  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  fatores de correção ligados a natureza do agregado graúdo e consistência do concreto, conforme a tabela 6 e 7.

Tabela 6 - Coeficiente  $\alpha_1$  em função do tipo de agregado graúdo do concreto – IBRACON (2003).

Tipo de agregado	$\alpha_1$
Basalto, diabásio e calcário sedimentar denso	1,1 a 1,2
Granito e gnaisse	1,0
Calcário metamórfico e metassedimento	0,9
Arenito	0,7

Fonte: adaptado pelo autor de IBRACON (2003).

Tabela 7 - Coeficiente  $\alpha_2$  em função da consistência do concreto – IBRACON (2003).

Consistência do concreto	$\alpha_2$
Fluida	0,9
Plástica	1,0
Seca	1,1

Fonte: adaptado pelo autor de IBRACON (2003).

A norma americana ACI 318 (2014) possibilita o cálculo do módulo de elasticidade secante ( $E_{cs}$ ) a 45% da resistência do concreto à compressão, pela seguinte expressão (Equação 4):

$$E_{cs} = 4700 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

Segundo Melo Neto e Helene (2002), o módulo de elasticidade tangente inicial é em torno de 1,1 vezes maior que o módulo secante a 0,45 de  $f_c$ , portanto, é possível ajustar a Equação 4 para o módulo tangente inicial (Equação 5).

$$E_{ci} = 5170 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

A norma FIB MODEL CODE (2010) afirma que o módulo de elasticidade tangente inicial dos concretos, que estão entre a faixa de 12MPa e 80MPa, pode ser estimado conforme a Equação 6 levando em consideração o mesmo fator  $\alpha_E$  da NBR 6118 (ABNT, 2014)

$$E_{ci} = 2,15 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3} = 2,15 \cdot 10 \quad (6)$$

A expressão sugerida pela norma EUROCODE 2 (2004) também leva em consideração a natureza do agregado e o módulo de elasticidade tangente inicial pode ser calculado para concretos de 12MPa a 90MPa, onde  $f_{ck}$  é dado em MPa e  $E_{ci}$  em GPa, conforme a Equação 7:

$$E_{ci} = 23,1 \cdot \alpha_E \left( \frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3} \quad (7)$$

Além das equações estipuladas por normas, vários pesquisadores sugerem equações ajustadas a partir de ensaios realizados com diferentes materiais e proporções distintas dos mesmos. Nunes (2005) analisou 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, em que  $E_{ci}$  é dado em GPa e  $f_{ck}$  em MPa. (Equação 8).

$$E_{ci} = 5,0f_{ck}^{0,5} \pm 3,42 \quad (8)$$

Dal Molin e Monteiro (1996) propunham a Equação 9 para estimar o módulo de elasticidade tangente inicial para concretos produzidos com agregado graúdo de origem basáltica e resistência à compressão na faixa de 20 MPa a 90 MPa, onde  $E_{ci}$  e  $f_{ck}$  são dados em MPa.

$$E_{ci} = 9570f_{ck}^{0,31} \quad (9)$$

Para agregados graúdos de natureza granítica, Martins (2008) estipulou a Equação 10 para estimar o módulo de elasticidade inicial, onde  $E_{ci}$  é dado em GPa e  $f_{ck}$  em MPa.

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

A tabela 8 reúne todas as equações anteriormente citadas para estimar o módulo de elasticidade a partir da resistência à compressão do concreto.

Tabela 8 - Modelos de previsão de módulo de elasticidade tangente inicial para concretos normais, em função da resistência a compressão em MPa.

Fonte/Norma	Expressão	Limite (MPa)
NBR 6118 (2014) item 8.2.8	$E_{ci} \propto \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}$	20MPa a 50MPa
	$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25\right)^{1/3}$	55MPa a 90MPa
IBRACON (2003)	$E_{ci} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}}$	15MPa a 50MPa
ACI 318 (2014)	$E_{ci} = 5170 \cdot \sqrt{f_{ck}}$	-
FIB MODEL CODE (2010)	$E_{ci} = 2,15 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{1/3}$	12MPa a 80MPa
EUROCODE 2 (2004)	$E_{ci} = 23,1 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + 8}{10}\right)^{0,3}$	12MPa a 90MPa
Nunes (2005)	$E_{ci} = 5,0 f_{ck}^{0,5} \pm 3,42$	Gnaise e sienito
Dal Molin e Monteiro (1996)	$E_{ci} = 9570 f_{ck}^{0,31}$	20MPa a 90MPa; Basalto
Martins (2008)	$E_{ci} = 10,467 f_{ck}^{0,2693}$	Granito

Fonte: autor (2016).

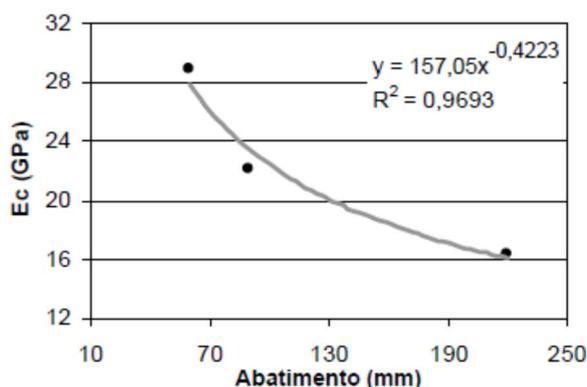
### 2.4.3. Fatores que afetam as propriedades do concreto endurecido

#### 2.4.3.1. Relação água/cimento

Melo Neto e Helene (2002) em pesquisa realizada comprovaram que com um fator a/c constante a diminuição do abatimento resultará em aumento do teor de agregados que conseqüentemente ocasionará um aumento do módulo de elasticidade, como mostra a figura 5. E como esperado, valores também encontrados

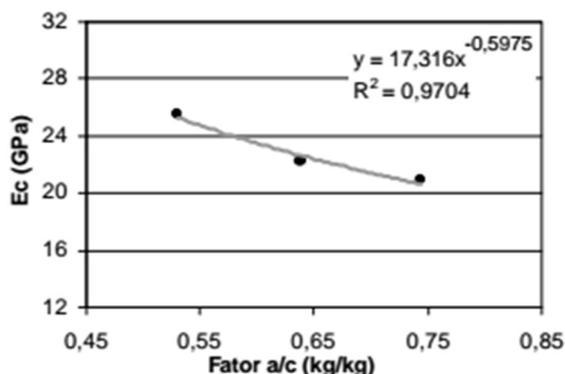
por Rohden (2011), uma diminuição do fator a/c, mantendo abatimento constante, faz com que aumente o módulo de elasticidade do concreto, conforme demonstra a figura 6.

Figura 5 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o abatimento (a/c = cte).



Fonte: Melo Neto e Helene (2002).

Figura 6 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o fator a/c (abatimento = cte).



Fonte: Melo Neto e Helene (2002).

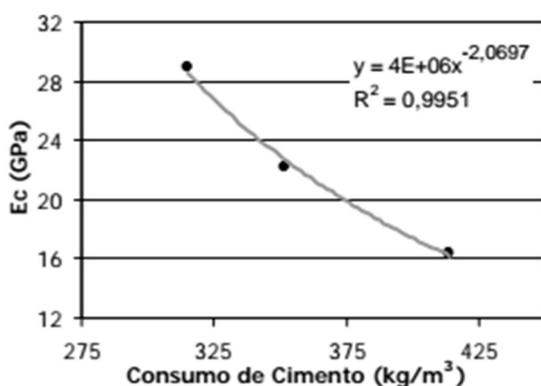
Para Vieira (2008), após a análise com diferentes tipos de cimento, e obtendo em todos uma relação de queda do módulo de elasticidade a medida em que se aumentava a relação a/c, pode-se constatar que a porosidade está intimamente ligada ao módulo de elasticidade do concreto. A porosidade ocasionada devido a água livre dentro do concreto aumenta proporcionalmente ao aumento da água na mistura gerando um afastamento dos grãos de cimento, tornando a ligação pasta-agregado mais frágil e possibilitando a formação de fissuras.

### 2.4.3.2. Consumo de cimento

O consumo de cimento influencia o módulo de duas formas distintas. Mantendo-se a relação água-cimento constante, e aumentando-se o consumo de cimento, o módulo de deformação diminui. A explicação segundo Nunes (2005) é dada pela redução do teor de agregados que tem módulo de elasticidade maior do que a pasta de cimento.

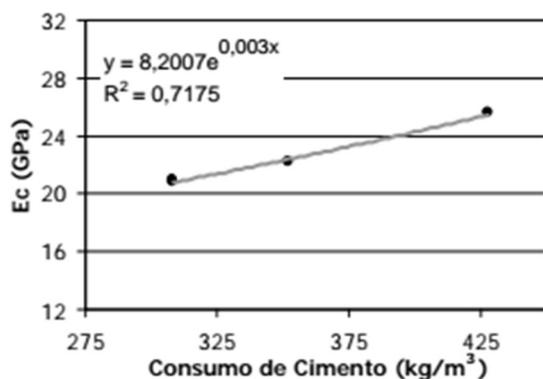
Melo Neto e Helene (2002) realizaram ensaios onde variam a relação  $a/c$  e o abatimento deixando em ambos os casos um dos fatores constante. Ao manter uma relação  $a/c$  constante (figura 7) ocorre a diminuição do módulo de elasticidade pois como o agregado tem um módulo de elasticidade menor que a pasta e nesse caso é diminuído, o módulo de elasticidade do concreto também reduz. Ao se manter o abatimento constante (figura 8) o fator  $a/c$  varia e proporciona um aumento do módulo da pasta que nesse caso comanda o aumento do módulo elástico do concreto.

Figura 7 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o consumo de cimento ( $a/c = cte$ ).



Fonte: Melo Neto e Helene (2002).

Figura 8 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o consumo de cimento (abatimento = cte).

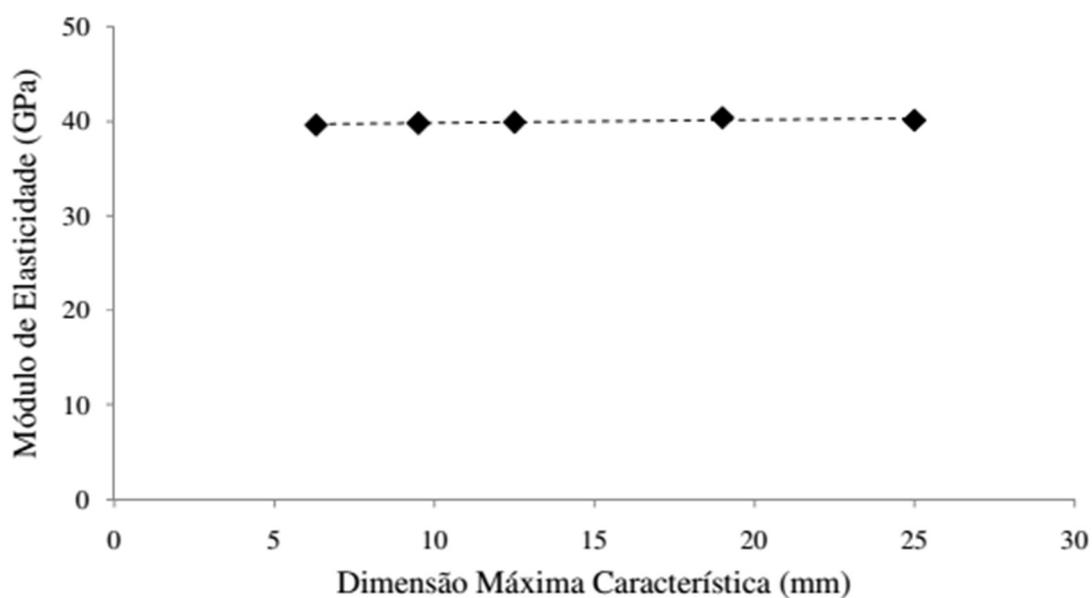


Fonte: Melo Neto e Helene (2002).

#### 2.4.3.3. Dimensão máxima do agregado

Para Rohden (2011) a dimensão máxima característica do agregado graúdo não foi considerada significativa estatisticamente como um fator que modificaria o resultado do módulo de elasticidade do concreto, como demonstra a figura 9.

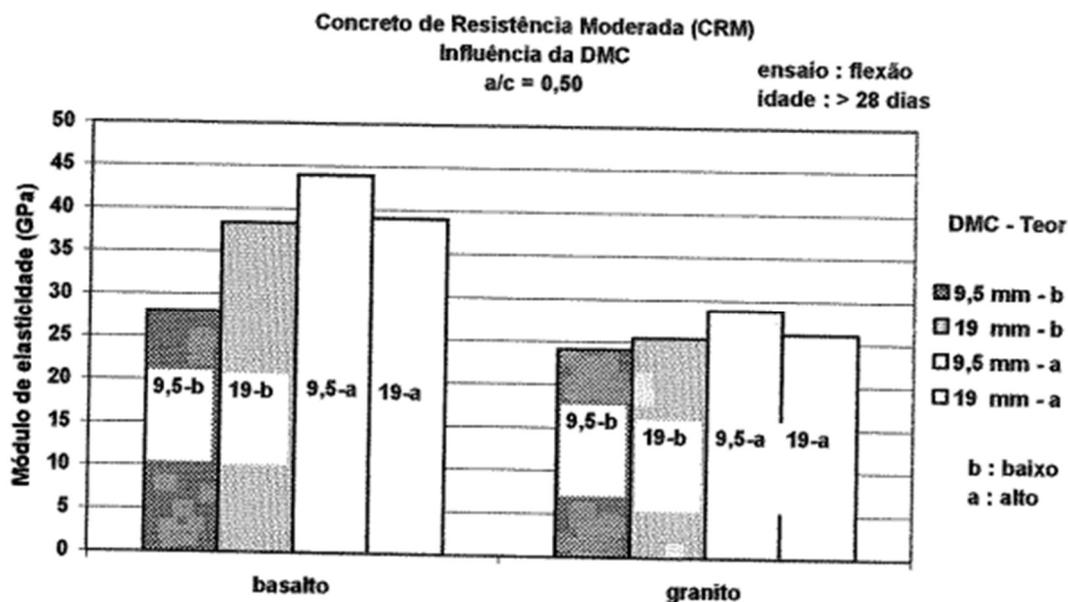
Figura 9 - Efeito da dimensão máxima característica da rocha no módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Rohden (2011).

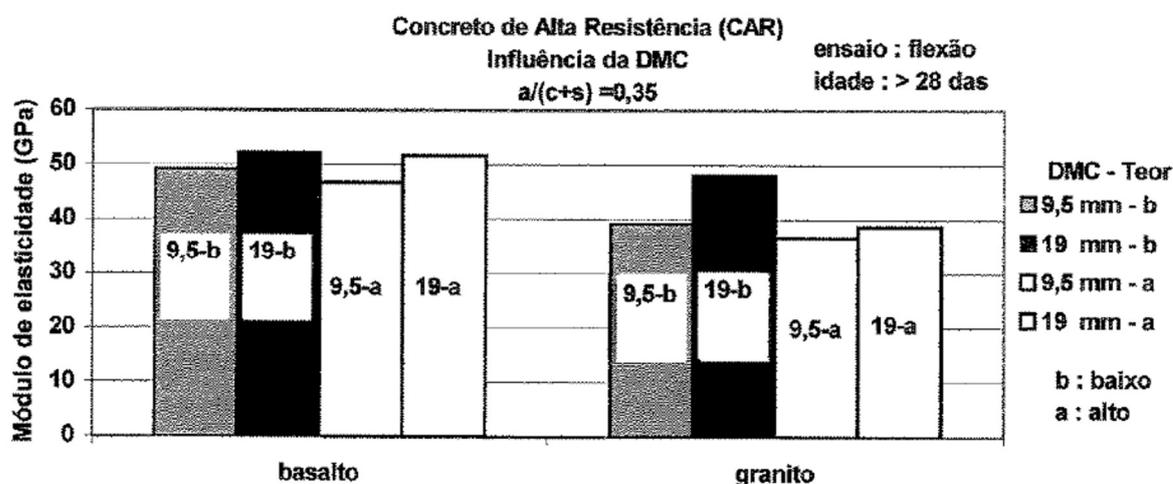
Barbosa et al (1999) relatam que com o emprego de agregados graúdos de basalto com dimensão máxima de 19,5mm obtiveram valores de módulo de elasticidade maiores do que quando utilizado agregado com dimensão máxima de 9,5mm. Pompeu (2004) em seus ensaios elaborou traços com baixo (b) e alto (a), teores de agregado graúdo e obteve valores de módulo de elasticidade menores apenas quando se aumentou a DMC do agregado em concretos de resistência moderada (CRM) com alto teor de agregado graúdo (figura 10). Já em concretos de alta resistência (CAR) fica nítido que em ambos teores de agregados graúdos o módulo de elasticidade aumenta conforme aumenta a DMC do agregado, de acordo com a figura 11.

Figura 10 - Influência da DMC do agregado graúdo no módulo de elasticidade dos concretos de resistência moderada (CRM).



Fonte: Pompeu (2004).

Figura 11 - Influência da DMC do agregado graúdo no módulo de elasticidade dos concretos de alta resistência (CAR).



Fonte: Pompeu (2004).

Barbosa et al (1999) empregou agregados graúdos de basalto com dimensão máxima de 19,5mm e constatou que os valores de módulo de elasticidade eram maiores se mantidos os demais parâmetros e apenas modificando a dimensão para 9,5mm em todas as idades ensaiadas. Pereira Neto e Djanikian (1996) analisaram diversos agregados e constataram diferentes resultados. Se analisado apenas a idade de 28 dias na figura 12, pode-se notar uma estabilidade do módulo de elasticidade em agregados de granito e calcário ao se variar a DMC, uma leve tendência de aumento em agregados de basalto, e uma elevação significativa do módulo em agregados de gnaiss e diabásio sendo que tal diferença continua em idades maiores, como 56 dias

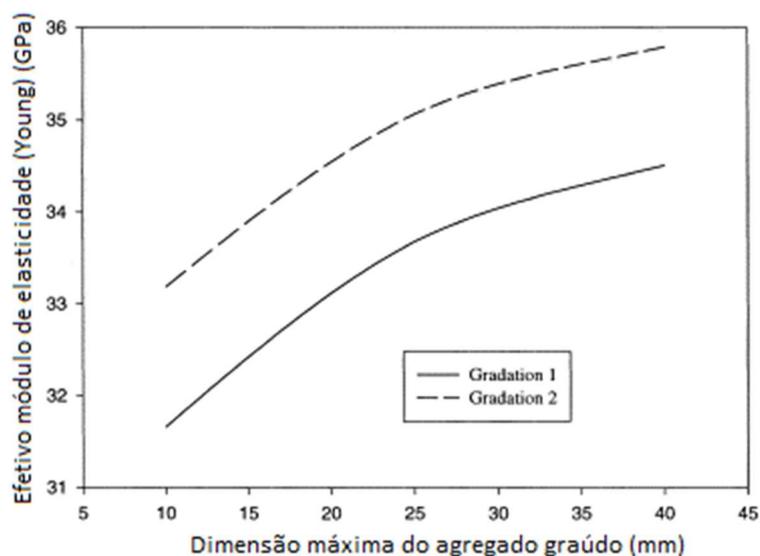
Figura 12 - Influência da dimensão máxima e do tipo do agregado sobre o módulo de elasticidade do concreto.

Natureza do agregado	Idade (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)		
		9,5 mm	19 mm	25 mm
Granito	14 dias	31,92	31,45	31,19
Gnaisse		32,15	33,68	-
Basalto		39,21	39,06	38,51
Diabásio		32,57	36,01	38,36
Cálcario		-	37,46	38,39
Granito	28 dias	31,85	33,19	32,88
Gnaisse		34,62	35,46	39,06
Basalto		40,94	40,06	42,78
Diabásio		35,37	37,53	39,31
Cálcario		-	38,89	39,92
Granito	56 dias	32,89	34,28	34,78
Gnaisse		35,37	37,60	39,73
Basalto		43,14	43,96	43,11
Diabásio		37,90	39,76	41,39
Cálcario		-	44,29	42,04

Fonte: Pereira Neto e Djanikian (1996).

Li et. al (1999) avaliou empiricamente que variando a dimensão máxima característica até certo ponto tem-se um grande efeito sobre o módulo de elasticidade em dimensões relativamente usuais, e que ao continuar aumentando o tamanho máximo das partículas esse efeito tende a suavizar, conforme mostra a figura 13.

Figura 13 - Influência da dimensão máxima do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Li et. al (1999).

Carbonell (1996) em estudo realizado em Barcelona na Espanha, propôs a Equação 11 que relaciona o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) com a dimensão máxima do agregado graúdo ( $dm_{\max}$ ).

$$E_c = 50000((fck)^{\frac{1}{3}} - 1,5 + 1,2\log_{10}dm_{\max}) \quad (11)$$

Onde:

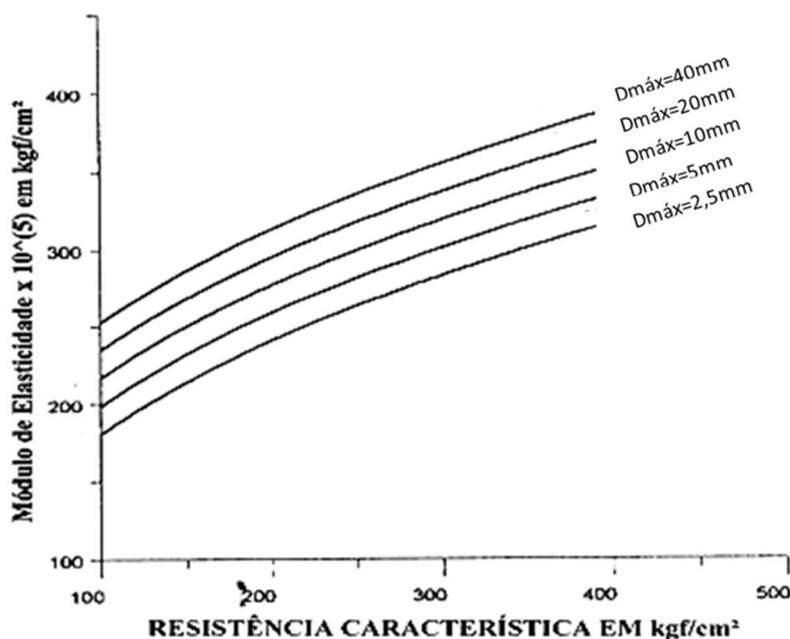
$fck$  está em  $kgf/cm^2$

$dm_{\max}$  em mm

$E_c$  em  $kgf/cm^2$

A partir da Equação 11, representou-se graficamente curvas para o módulo de elasticidade, em função da dimensão máxima do agregado com valores de 2,5mm, 5,0mm, 10,0mm, 20mm e 40mm, conforme figura 14.

Figura 14 - Valores do Módulo estático de elasticidade em função da resistência à compressão em corpos-de-prova para diferentes dimensões máxima de agregado.

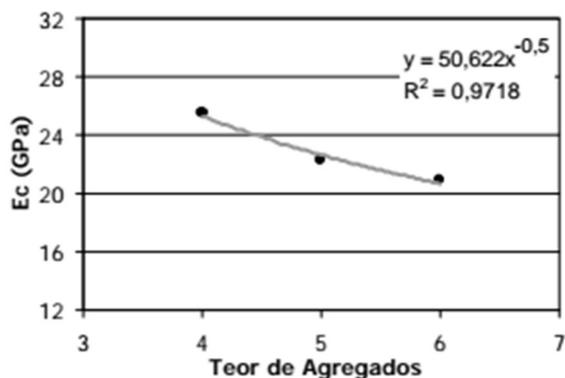


Fonte: CARBONEL, 1996, p. 28.

#### 2.4.3.4. Teor do agregado graúdo

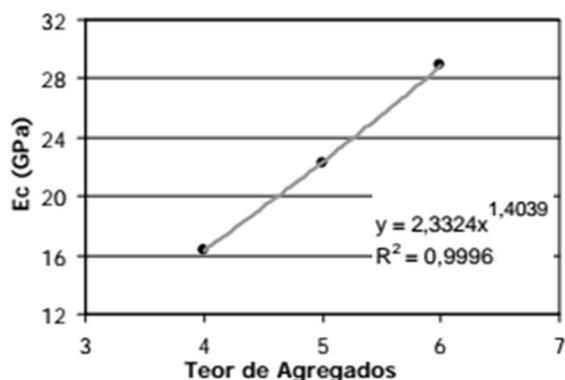
Melo Neto e Helene (2002) observam uma diminuição do módulo de elasticidade com o aumento do teor de agregado em traços com abatimentos constantes, conforme a figura 15, que pode ser explicado por Helene e Monteiro (1993) pelo fato de que o aumento do teor de agregados é prejudicado por ter que se reduzir o fator  $a/c$  para manter o abatimento constante reduzindo a resistência da pasta. Já pelo contrário se o fator  $a/c$  for constante o aumento do teor de agregado ocorre normalmente como esperado, como mostra a figura 16, aumentando o módulo devido a maior quantidade de agregado graúdo que possui módulo de elasticidade maior que o da pasta de cimento.

Figura 15 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (abatimento = cte).



Fonte: Melo Neto e Helene (2002).

Figura 16 - Gráfico do módulo de elasticidade versus o teor de agregados (a/c = cte).



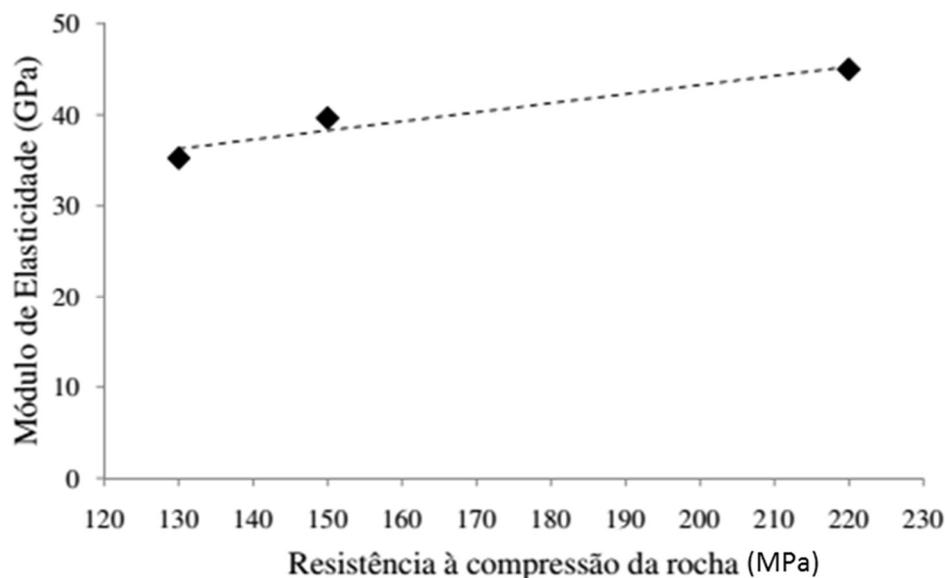
Fonte: Melo Neto e Helene (2002).

Neville (2013) reforça que, como o agregado normalmente apresenta maior módulo de elasticidade do que a pasta de cimento hidratada, um maior teor de um determinado agregado resulta em um maior módulo de elasticidade do concreto a uma determinada resistência à compressão.

#### 2.4.3.5. Resistência do agregado

Rohden (2011) em pesquisa, como exposto na figura 17, observou que para todos os níveis de consumo de água ocorreu uma tendência de aumento do módulo de elasticidade com o aumento da resistência de compressão da rocha.

Figura 17 - Efeito da resistência a compressão da rocha no módulo de elasticidade médio do concreto.



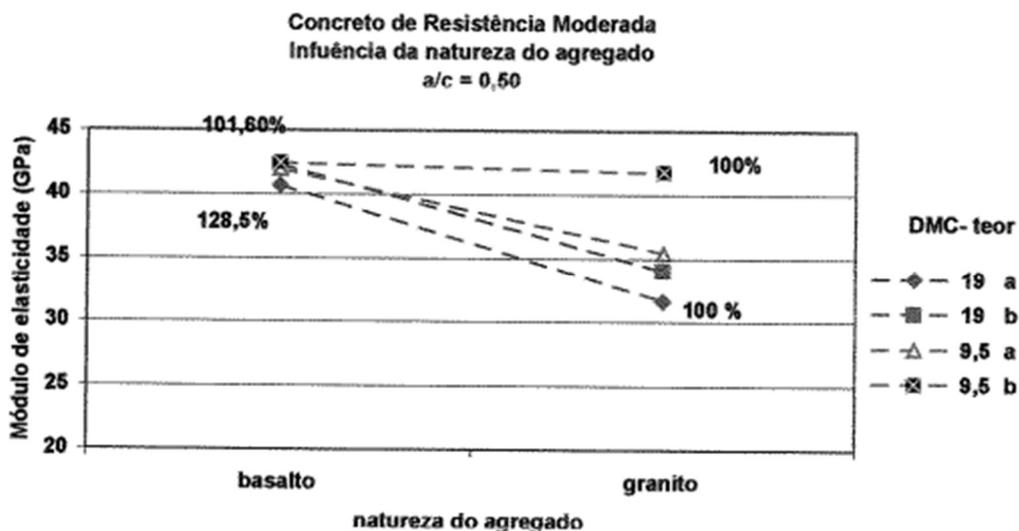
Fonte: Rohden (2011).

#### 2.4.3.6. Natureza do agregado

Os agregados por serem gerados de diferentes tipos de rocha formadas de maneiras diferentes, apresentam diversidades em suas propriedades. Dependendo de sua microestrutura os agregados, podem apresentar diferentes valores para algumas características como a resistência mecânica, a absorção, a dureza e o módulo de elasticidade, os quais podem influenciar no comportamento do concreto de baixa e alta resistência (POMPEU, 2004).

Pompeu (2004) cita que as propriedades elásticas do concreto são influenciadas pelas propriedades elásticas dos materiais constituintes e natureza da zona de transição entre os agregados e a pasta, e que em concretos fabricados com basalto houve um aumento de 1,6% a 28,5% se comparados ao fabricados com granito, como demonstra a figura 18, podendo ser analisado que, independente do teor, alto (a) ou baixo (b), de agregado graúdo o módulo de elasticidade é maior para o basalto.

Figura 18 - Influência da natureza do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Pompeu (2004).

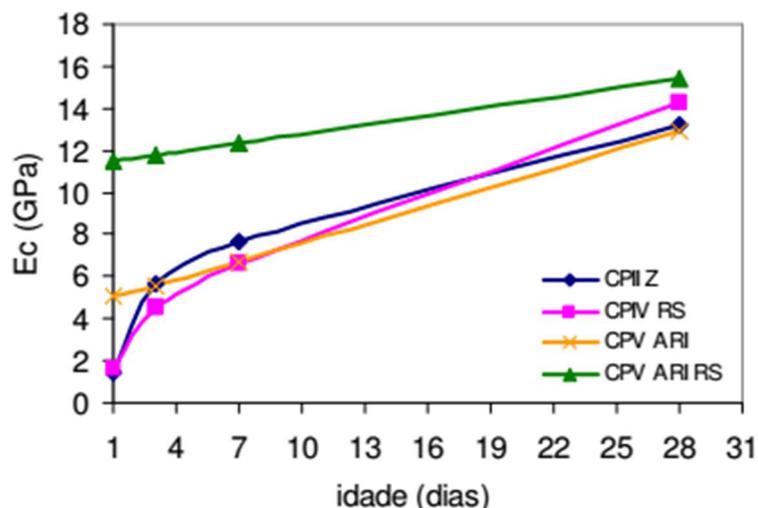
O estudo de Pereira Neto e Djanikian (1996) empregando agregados de granito, gnaiss, basalto, diabásio e calcário, mostra que os maiores valores de módulo de elasticidade do concreto foram encontrados também com agregados de basalto.

#### 2.4.4. Fatores que afetam a determinação das propriedades do concreto

##### 2.4.4.1. Idade

Vieira (2008) ressalta que a com o aumento da idade do concreto o módulo tende a aumentar para todos os tipos de cimento. Porém o aumento é mais significativo para o cimento CPV ARI RS nas primeiras idades, que apresentou um ganho de módulo de elasticidade em torno de duas vezes mais em relação aos demais, no entanto com o passar do tempo a diferença tende a diminuir, como demonstrado na figura 19.

Figura 19 - Efeito da idade sobre o módulo de elasticidade do concreto.



Fonte: Vieira (2008).

#### 2.4.4.2. Condições de cura

Vieira (2008) afirma que não ocorre diferença significativa a partir de uma análise de variância entre os corpos de prova de concreto curados no ambiente e dentro de câmara úmida. Porém, para Dal Molin e Monteiro (1996), ao realizar ensaios com diferentes tipos de cura no concreto constataram que o material é afetado por diferentes métodos, porém que não são da mesma ordem de grandeza para a resistência a compressão e para o módulo de elasticidade. A cura em ambiente de laboratório, no estudo dos autores, levou a uma redução do módulo de elasticidade em relação a cura úmida.

Acredita-se que as condições de cura em si não influenciem o módulo de elasticidade além do efeito da cura sobre a resistência. Além do mais, é necessário distinguir a influência da cura sobre o módulo de elasticidade, que também afeta a resistência, da influência da condição de umidade durante o ensaio. (PACHECO, 2006).

#### **2.4.4.3. Parâmetros de ensaio**

Todos os ensaios tanto para concreto, agregados, betumes, solos ou até mesmo elementos construtivos carecem de cuidados na realização e devem seguir os parâmetros estipulados pelas normas. As normas realizam uma viabilidade de realização de ensaios interlaboratoriais onde os valores para concretos produzidos, com os mesmos materiais, alcancem resistências próximas e possam ser reproduzidos em estudos similares, obtendo assim mais aprofundamento em pesquisas sobre o tema de diversos assuntos ligados aos produtos (ROHDEN, 2011).

#### **2.4.4.4. Umidade do corpo de prova**

Segundo Mehta e Monteiro (2014) os corpos de prova ensaiados úmidos apresentam valores de módulo de deformação aproximadamente 15% maiores que os corpos de prova ensaiados em condições secas. Tal parâmetro de aumento é confirmado por Neville (2013) que ressalta que em concretos com 34 MPa de resistência já se obtiveram valores com aumento na ordem de 10% na condição seca, porém, se o período de secagem for menor que 6 horas, o aumento da resistência será menor que 5% do que ensaiado úmido.

#### **2.4.4.5. Velocidade do carregamento**

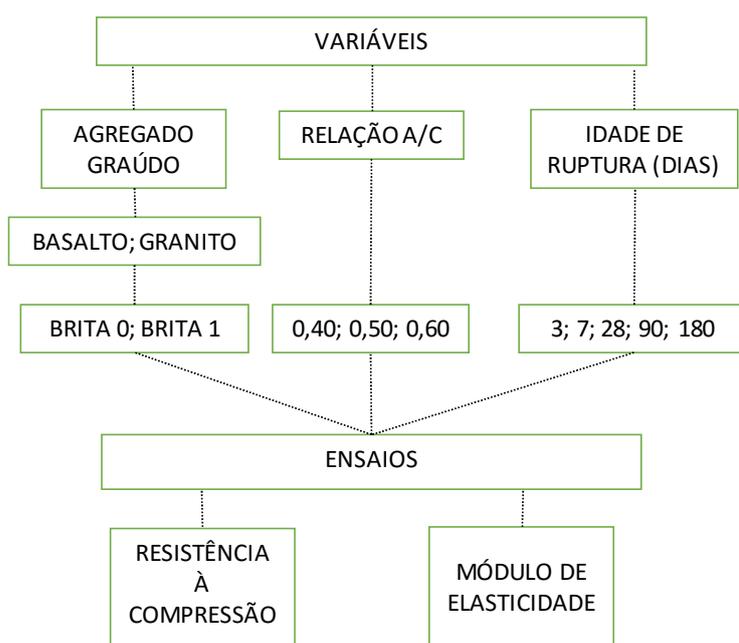
Os ensaios relativos ao concreto se aplicados com velocidades mais elevadas ou muito lentas mascaram os resultados obtidos e não demonstram o real valor do parâmetro. Alhadas (2008) cita que com o aumento da velocidade de carregamento ocorre um aumento no valor do módulo de deformação do material e que é por isso que as normas de ensaio especificam a taxa de incremento da tensão ou de deformação durante a execução dos ensaios.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada foi a de experimentação por meio de ensaios, onde foram verificadas as propriedades apresentadas pelo agregado sobre a influência nas características mecânicas do concreto.

Foram analisadas nas idades de 3, 7, 28, 90 e 180 dias, as propriedades mecânicas das diferentes dosagens com agregados de basalto e de granito, variando a relação água/cimento e a dimensão máxima característica dos agregados nas misturas. É possível analisar o fluxograma dos materiais e métodos utilizados na figura 20.

Figura 20 - Fluxograma dos materiais e métodos utilizados.



Fonte: autor (2017).

### **3.1. Materiais**

Os agregados graúdos utilizados são provenientes da região metropolitana de Porto Alegre, devido a análise prévia de melhor adequação do índice de forma de cada mineralogia do que a encontrada próxima a localidade da pesquisa. Os materiais disponíveis nas redondezas da instituição de ensino apresentavam elevado coeficiente de índice de forma, o que poderia prejudicar ou mascarar os resultados obtidos nos ensaios e dificultar a obtenção de relações a/c correspondentes as dosagens requeridas.

O cimento utilizado foi do tipo V, de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CPV – ARI – RS), devido a análise prévia de dosagens que comprovaram que os demais cimentos disponíveis no mercado local, se utilizados para obter uma relação a/c reduzida, com a introdução de aditivos, formavam uma pasta com alta coesão e dificultava a moldagem dos corpos de prova.

A areia que compõe o traço é também da região metropolitana de Porto Alegre, por apresentar granulometria adequada ao que especifica a norma e ser do mesmo fornecedor dos demais agregados.

As dosagens e os ensaios foram realizados junto ao LATEC (Laboratório de Tecnologia de Construção) da Univates, em Lajeado/RS.

#### **3.1.1. Ensaios propostos para os agregados**

Para verificação das propriedades dos agregados foi necessária a realização dos seguintes ensaios:

- a) análise granulométrica: com o ensaio foi possível determinar a dimensão máxima característica do agregado graúdo e também realizar a devida comparação com o que especifica a NBR 7211 (ABNT, 2011) sobre as faixas granulométricas em que o agregado, tanto graúdo como miúdo, destinado ao concreto, apresenta. Ambas granulometrias ficaram dentro do aceitável, visto que, para o agregado graúdo, é permitido, segundo a norma,

desvio de 5% em determinadas frações ou distribuído até esse máximo entre as faixas passíveis. Com o ensaio também foi determinado o módulo de finura da areia, que segundo a especificação da NBR 7211 (ABNT, 2011) deve estar compreendido entre 2,20 e 2,90 na zona ótima de utilização. Tal ensaio foi realizado conforme estipula a NBR NM 248 (ABNT, 2003);

- b) índice de forma: a realização do ensaio se faz necessária devido a mudança que pode apresentar o concreto produzido no que diz respeito a trabalhabilidade obtida. Pedras muito lamelares podem prejudicar a plasticidade do produto final requerendo mais água para que seja possível uma consistência adequada. O ensaio é explicitado pela NBR 7809 (ABNT, 2006), e segundo a NBR 7211 (ABNT, 2011), o valor encontrado não deve ser superior a 3;
- c) ensaio de absorção: a absorção dos agregados pode reduzir a relação a/c do concreto e modificar a sua consistência, quando em estado não saturado, alterando propriedades específicas como a resistência e o módulo de elasticidade que se pretende determinar posteriormente. O ensaio segue o que estipula a NBR NM 30 (ABNT, 2001);
- d) determinação da massa específica e unitária: para realização da dosagem segundo o método da ABCP, as massas específicas dos agregados são necessárias e devem ser determinadas pela NBR NM 53 (ABNT, 2009), para o agregado graúdo, e pela NBR NM 52 (ABNT, 2009), para a areia. A NBR NM 45 (ABNT, 2006) estipula o método de ensaio para determinação das massas unitárias e do volume de vazios dos agregados.

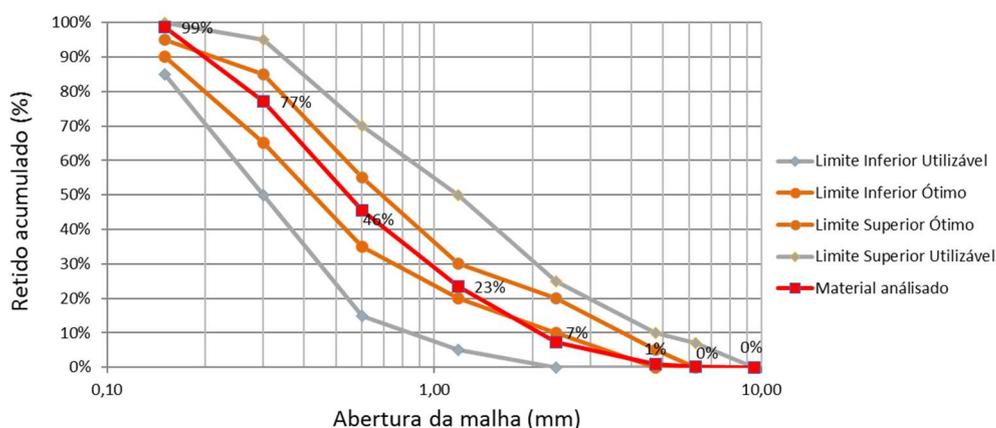
As propriedades dos agregados utilizados, para que se procedesse com os cálculos de dosagem a partir do método da ABCP, estão discriminadas na tabela 9 e foram determinados conforme as normas supracitadas. As curvas granulométricas dos agregados utilizados podem ser observadas nas figuras de 21 a 25.

Tabela 9 - Propriedades dos agregados a serem utilizados nas dosagens.

Material		Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	Massa unitária compactada (kg/m <sup>3</sup> )	Índice de forma	Módulo de finura	Absorção (%)	DMC (mm)
Basalto	Brita 0	2680	1365	1464	1,85	6,03	3,02	9,50
	Brita 1		1386	1481	1,70	6,88	2,96	19,00
Granito	Brita 0	2650	1358	1570	1,68	6,06	1,75	9,50
	Brita 1		1338	1450	1,78	7,10	1,64	19,00
Areia		2643	1558	-	-	2,53	-	4,75

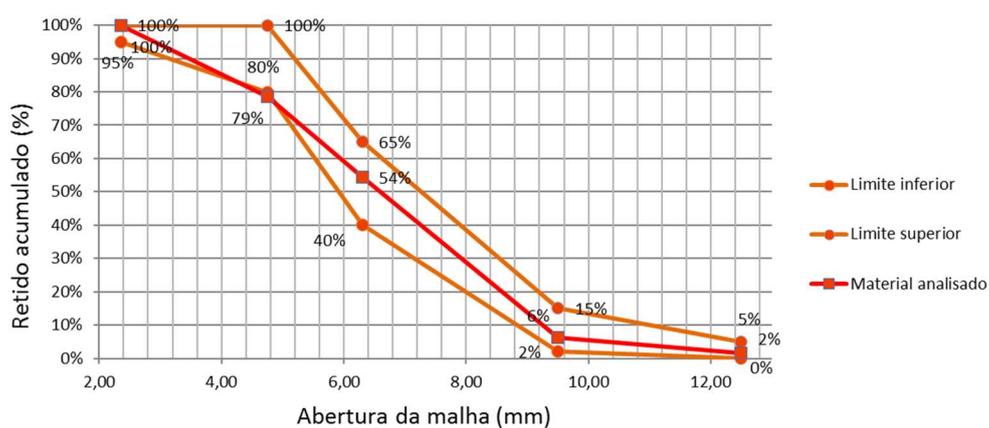
Fonte: autor (2017).

Figura 21 - Curva granulométrica da areia.



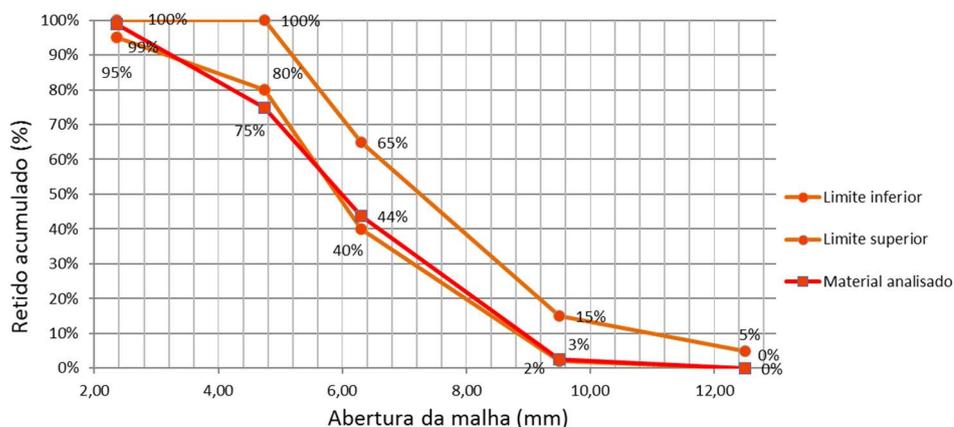
Fonte: autor, 2017.

Figura 22 - Curva granulométrica brita granito, DMC = 9,5mm.



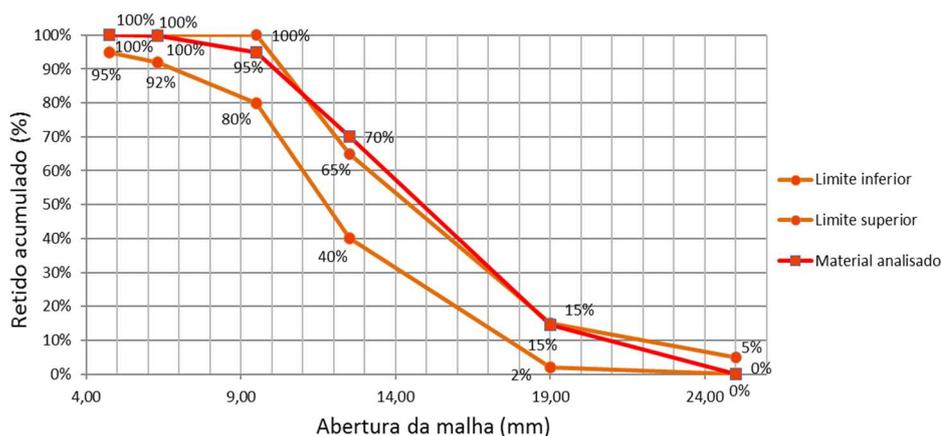
Fonte: autor, 2017.

Figura 23 - Curva granulométrica brita basalto, DMC = 9,5mm.



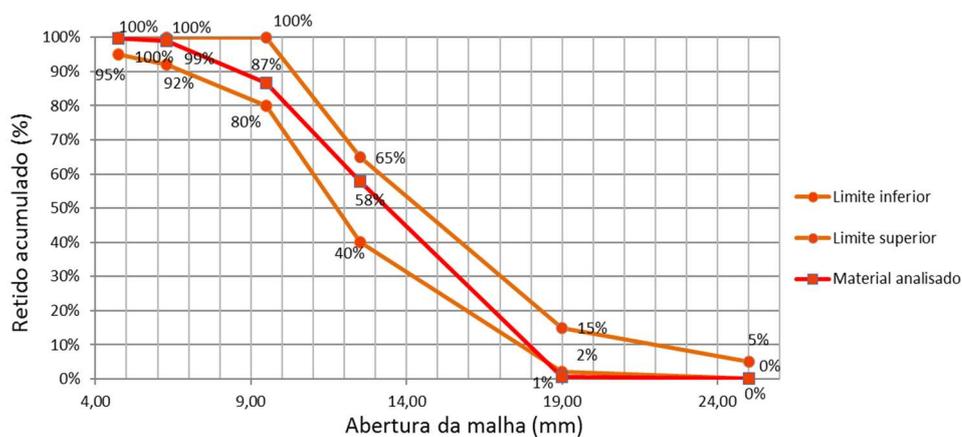
Fonte: autor, 2017.

Figura 24 - Curva granulométrica brita granito, DMC = 19mm.



Fonte: autor, 2017.

Figura 25 - Curva granulométrica brita basalto, DMC = 19mm.



Fonte: autor, 2017.

### 3.1.2. Ensaios propostos para o cimento

- a) massa específica: a massa específica do cimento é um dado a ser utilizado no cálculo de dosagem do método empregado. O ensaio realizado em um frasco de Le Chatelier é regido pela NBR NM 23 (ABNT, 2001). O valor encontrado a partir do ensaio foi de 3026kg/m<sup>3</sup> para o cimento tipo V, resistente a sulfatos, a ser utilizado.

### 3.2. Métodos

Para realização dos ensaios foram elaboradas dosagens segundo método da ABCP, definindo como ponto de partida variações da relação a/c. Os traços foram elaborados segundo o que prescreve o método de dosagem a partir das propriedades dos materiais encontradas. Cada traço unitário, em kg, está discriminado na tabela 10, e foi simplificado em siglas para identificação da composição das dosagens. Para dimensão de 9,5mm assume-se “B0”, 19mm como “B1”, para brita basalto “B”, para granito “G”, e para as relações a/c 0,4 como “4”, 0,5 como “5” e 0,6 sendo “6”. Por exemplo, a identificação, “B0-B-4”, se refere a um traço em que foi utilizado brita de dimensão 9,5mm, de origem basáltica e a relação a/c da mistura foi de 0,4.

Tabela 10 - Traços unitários dosados.

Identificação	Agregado	Relação a/c	Cimento	Areia	Brita
B0-B-4	Brita 0 - Basalto	0,40	1,00	1,20	1,49
B0-B-5		0,50	1,00	1,72	1,86
B0-B-6		0,60	1,00	2,23	2,23
B1-B-4	Brita 1 - Basalto	0,40	1,00	1,26	1,99
B1-B-5		0,50	1,00	1,79	2,49
B1-B-6		0,60	1,00	2,33	2,99
B0-G-4	Brita 0 - Granito	0,40	1,00	1,07	1,60
B0-G-5		0,50	1,00	1,56	2,00
B0-G-6		0,60	1,00	2,05	2,40
B1-G-4	Brita 1 - Granito	0,40	1,00	1,28	1,95
B1-G-5		0,50	1,00	1,82	2,44
B1-G-6		0,60	1,00	2,36	2,93

Fonte: autor (2017).

As relações a/c utilizadas tinham como objetivo abranger uma variação ampla de resistência. Tal variação visa possibilitar a análise do comportamento do módulo de elasticidade juntamente com a alteração da resistência a compressão e comparar tais valores aos que equacionam as normas e estimativas por elas estabelecidas.

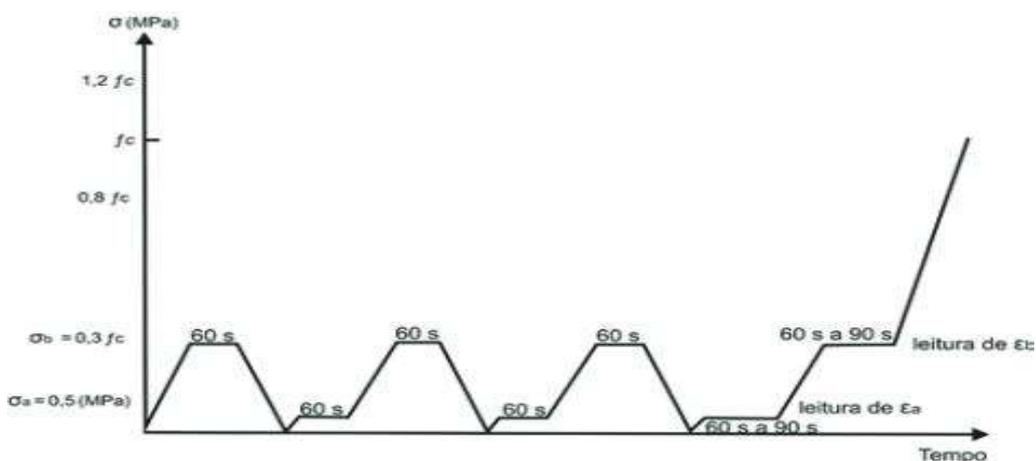
Cada dosagem teve um volume estimado de 48 litros por mistura, possibilitando a moldagem de cerca 30 corpos de prova por traço elaborado. Para cada ensaio de módulo de elasticidade são necessários 5 corpos de prova, 2 para compressão e outros 3 para o ensaio de módulo especificamente. As análises de resistência e módulo de elasticidade ocorreram em 3, 7, 28, 90 e 180 dias a partir da dosagem dos traços.

### **Ensaio propostos para o concreto**

- a) slump test: o ensaio de tronco de cone é sem dúvida um pré-requisito para que se possa realizar a moldagem dos corpos de prova, bem como aplicar os traços dosados em canteiros de obras onde o Slump deve ser adequado as condições de armaduras. Para que possa penetrar mais facilmente pelos espaços das barras, são utilizados equipamentos de adensamento, como vibradores, para que o concreto ocupe todos os vazios nos elementos. Tal ensaio tem seu procedimento discriminado na NBR NM 67 (ABNT, 1998). Como o foco das dosagens foi a relação a/c das dosagens a trabalhabilidade final foi a mínima necessária para a moldagem dos corpos de prova, visando não possibilitar alteração nas propriedades finais da mistura devido a demais adições.
  
- b) resistência a compressão: a partir da moldagem dos corpos de prova, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016), nas idades determinadas para realização dos rompimentos, foram realizados os ensaios de resistência a compressão, hoje o ensaio mais comum realizado no concreto. Tal procedimento foi realizado segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007). As faces das amostras foram regularizadas através de retífica.

- c) módulo de elasticidade: o ensaio foi realizado por meio de extensômetros eletrônicos que calculam automaticamente a deformação do corpo de prova devido as cargas a que é submetido. Foram rompidas, conforme estipula a metodologia A (tensão  $\sigma_a$  fixa) da NBR 8522 (ABNT, 2008), duas amostras por compressão simples, e com os valores obtidos foi estimada a ruptura de mais 3 amostras posteriormente ensaiadas para determinação do módulo estático de elasticidade ( $E_{ci}$ ). O ensaio consiste em 4 ciclos de carregamento do corpo de prova, conforme figura 26, em 30% da resistência estimada de ruptura e descarregamento até 0,5 MPa. Após o último patamar de carregamento retiram-se os extensômetros da amostra e a mesma é ensaiada à compressão, sendo que o valor final do ensaio deve estar compreendido entre 80% e 120% da ruptura prevista. Na figura 27, a disposição do corpo de prova para obtenção das leituras de deformação.

Figura 26 – Histórico de carregamento para a determinação do módulo de elasticidade – Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa.



Fonte: ABNT NBR 8522, 2008.

Figura 27 - Extensômetros fixados no corpo de prova.



Fonte: autor, 2017.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem por finalidade apresentar os resultados dos ensaios de determinação de resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos produzidos conforme descrito nos materiais e métodos desta pesquisa. Apresenta-se a evolução no ganho de resistência e do módulo de elasticidade do concreto com a idade, bem como a comparação entre as variáveis que apresentam as dosagens elaboradas com o que prescrevem as estimativas bibliográficas. Ao final foi realizada análise de variância (ANOVA) para comprovar significância das alterações nos traços.

### 4.1. Resistência à compressão

A tabela 11 apresenta os valores potenciais de resistência à compressão de todos os concretos em cada uma das idades em que as amostras foram ensaiadas bem como a relação entre a resistência na idade de ensaio relacionada ao valor encontrado na idade de 28 dias, sendo esta, considerada como 100%. A faixa de resistência potencial aos 28 dias dos concretos B0-B foi de 42,15 a 66,58 MPa, dos concretos B1-B de 45,05 a 68,39 MPa, para os concretos B0-G foi de 39,89 a 58,43 MPa, e de 40,16 a 62,92 MPa para os concretos B1-G.

As figuras de 28 a 31 exibem os gráficos de ganho de resistência à compressão em função da idade dos concretos. Os concretos ensaiados em média apresentaram uma padronização de crescimento da resistência ao longo do tempo, em média aos 3 dias de idade as amostras apresentavam 72% da resistência característica aos 28 dias, e 83% aos 7 dias de cura. Já após os 28 dias pode se notar ainda um aumento médio de 16% aos 90 dias e já, estabilizando a curva de

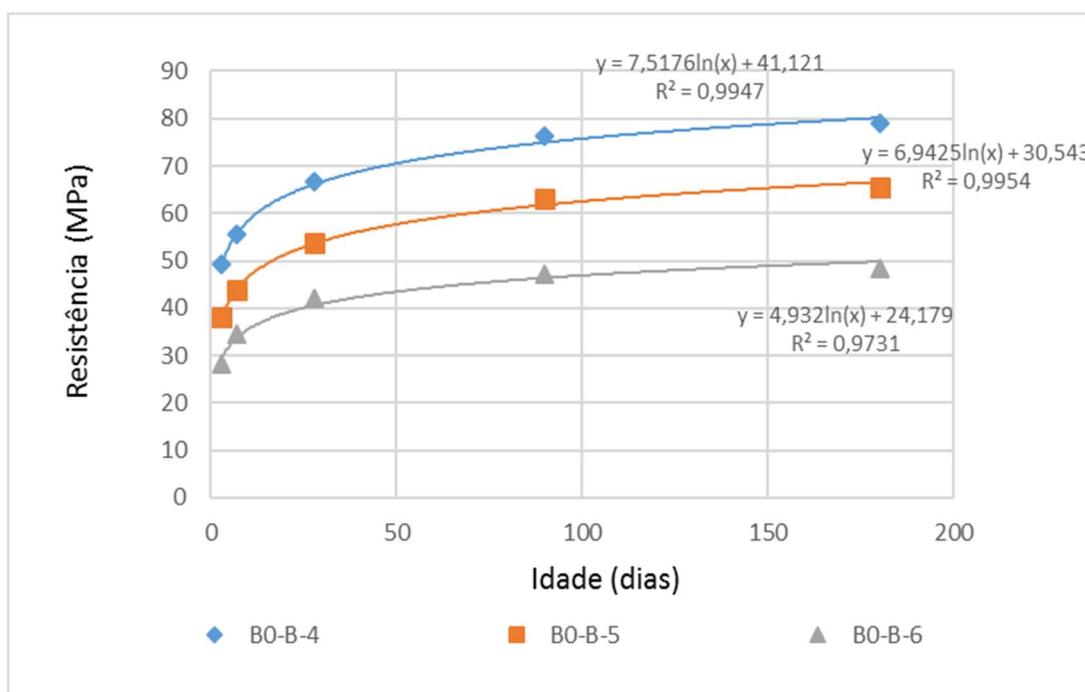
crescimento de resistência, aos 180 dias as amostras apresentaram um crescimento de 20% em relação aos 28 dias.

Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão de todos os concretos.

TRAÇO	$f_{c3}$ (MPa)	$f_{c7}$ (MPa)	$f_{c28}$ (MPa)	$f_{c90}$ (MPa)	$f_{c180}$ (MPa)	$f_{c3}/f_{c28}$	$f_{c7}/f_{c28}$	$f_{c28}/f_{c28}$	$f_{c90}/f_{c28}$	$f_{c180}/f_{c28}$
B0-B-4	49,15	55,53	66,58	76,24	78,91	74%	83%	100%	115%	119%
B0-B-5	38,21	43,76	53,63	63,05	65,63	71%	82%	100%	118%	122%
B0-B-6	28,21	34,49	42,15	47,10	48,20	67%	82%	100%	112%	114%
B1-B-4	52,77	59,34	68,39	81,92	83,48	77%	87%	100%	120%	122%
B1-B-5	40,72	46,25	57,31	64,24	66,56	71%	81%	100%	112%	116%
B1-B-6	30,50	37,63	45,05	51,92	53,60	68%	84%	100%	115%	119%
B0-G-4	44,43	50,29	58,43	69,84	74,28	76%	86%	100%	120%	127%
B0-G-5	35,90	40,95	49,58	60,31	64,10	72%	83%	100%	122%	129%
B0-G-6	27,27	33,60	39,89	48,24	49,16	68%	84%	100%	121%	123%
B1-G-4	45,50	50,15	62,92	67,92	70,20	72%	80%	100%	108%	112%
B1-G-5	37,68	43,20	49,94	59,38	61,98	75%	87%	100%	119%	124%
B1-G-6	28,42	32,92	40,16	45,02	47,15	71%	82%	100%	112%	117%

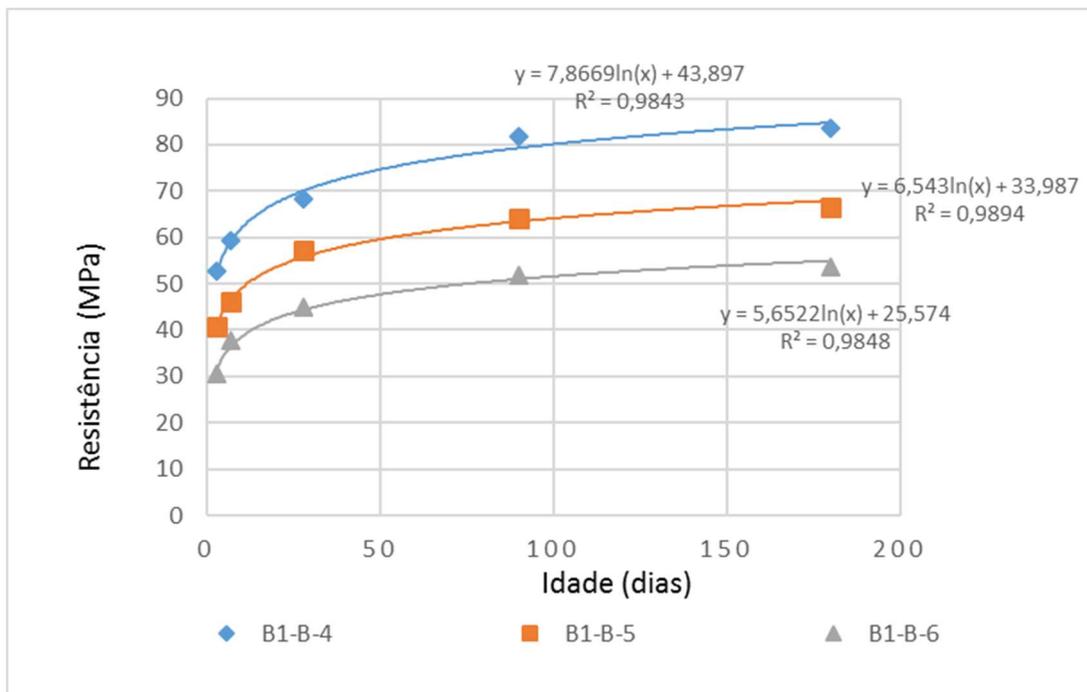
Fonte: Autor, 2017.

Figura 28 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B0-B.



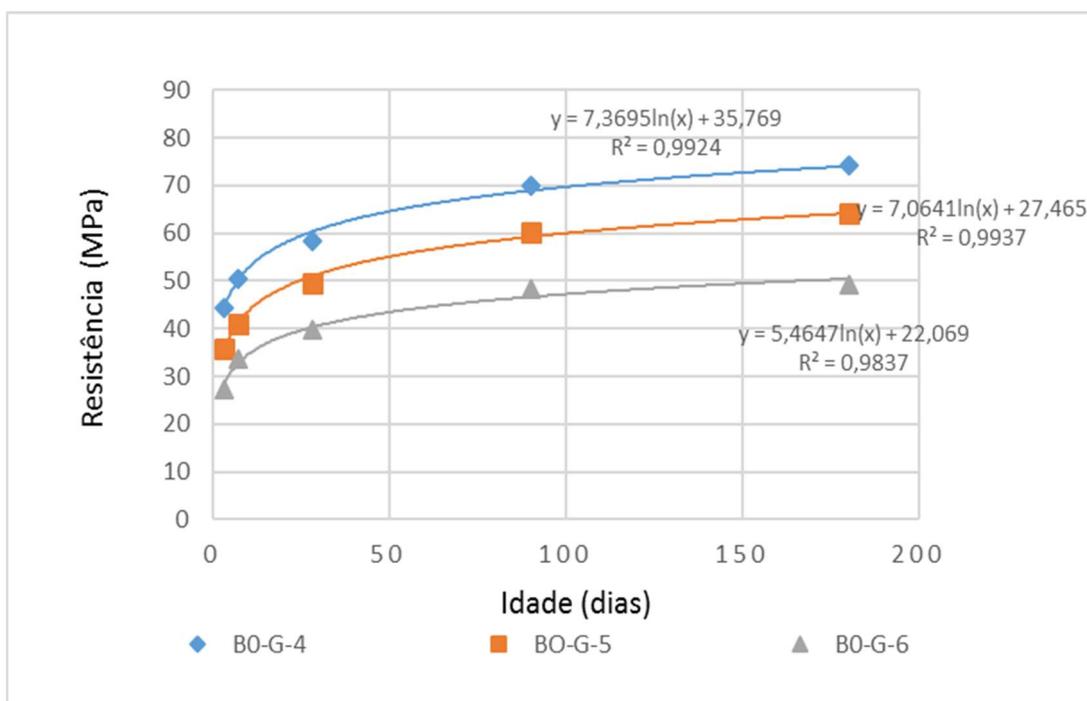
Fonte: Autor, 2017.

Figura 29 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B1-B.



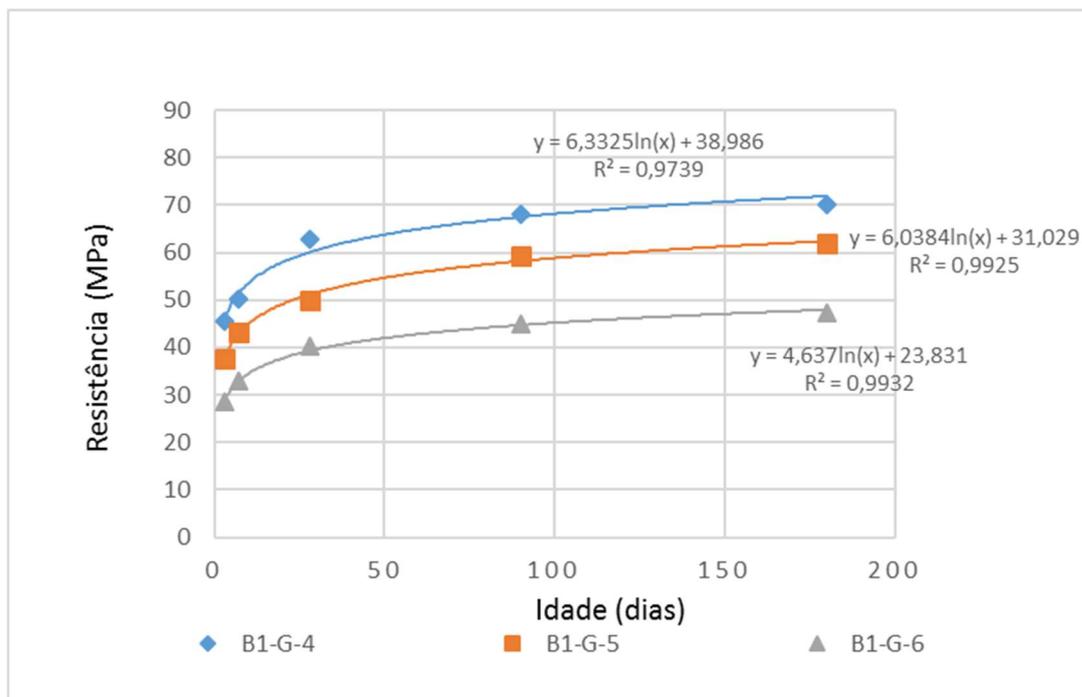
Fonte: Autor, 2017.

Figura 30 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B0-G.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 31 - Resistência à compressão em função da idade dos concretos B1-G.

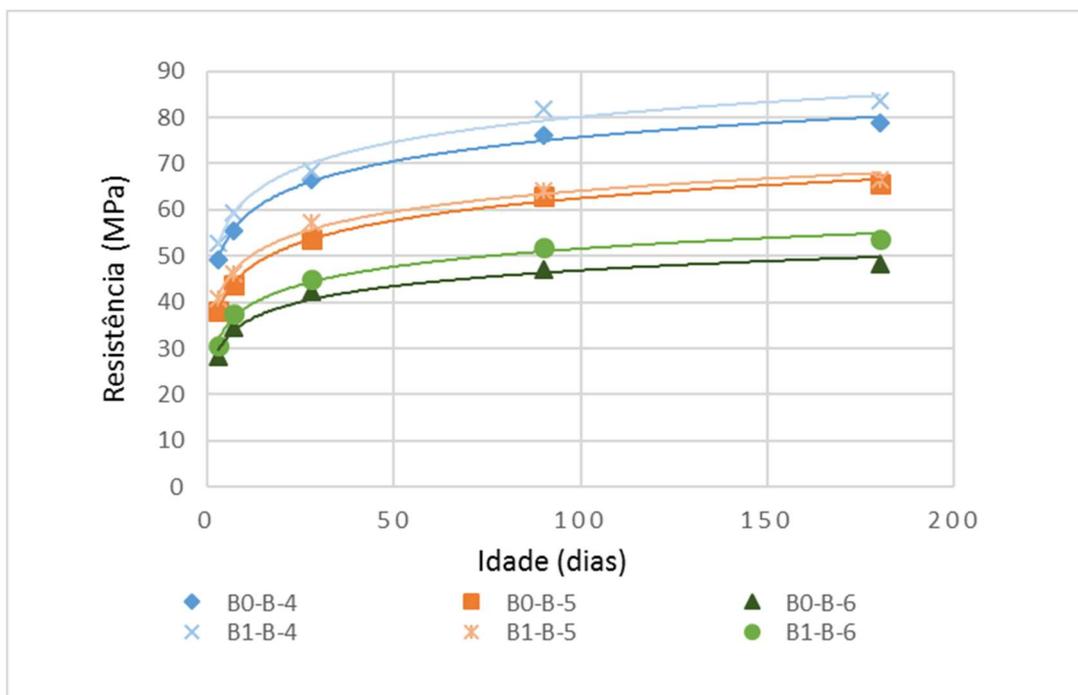


Fonte: Autor, 2017.

As figuras de 32 a 35 apresentam os resultados de resistência à compressão alternando entre comparações da mesma natureza do agregado graúdo, alterando a dimensão máxima característica, e diferente natureza do agregado graúdo, mantendo-se a dimensão máxima característica. Na figura 32, pode-se observar que o concreto produzido com brita basalto com DMC de 19mm teve em média resistências 6,5% maiores que os concretos produzidos com a DMC de 9,5mm. No caso dos concretos produzidos com brita granito, figura 33, os resultados de resistência entre as dimensões foram bem próximos até a idade de 28 dias, após isso os concretos produzidos com DMC de 9,5mm superaram em cerca de 4,1% os com DMC de 19mm.

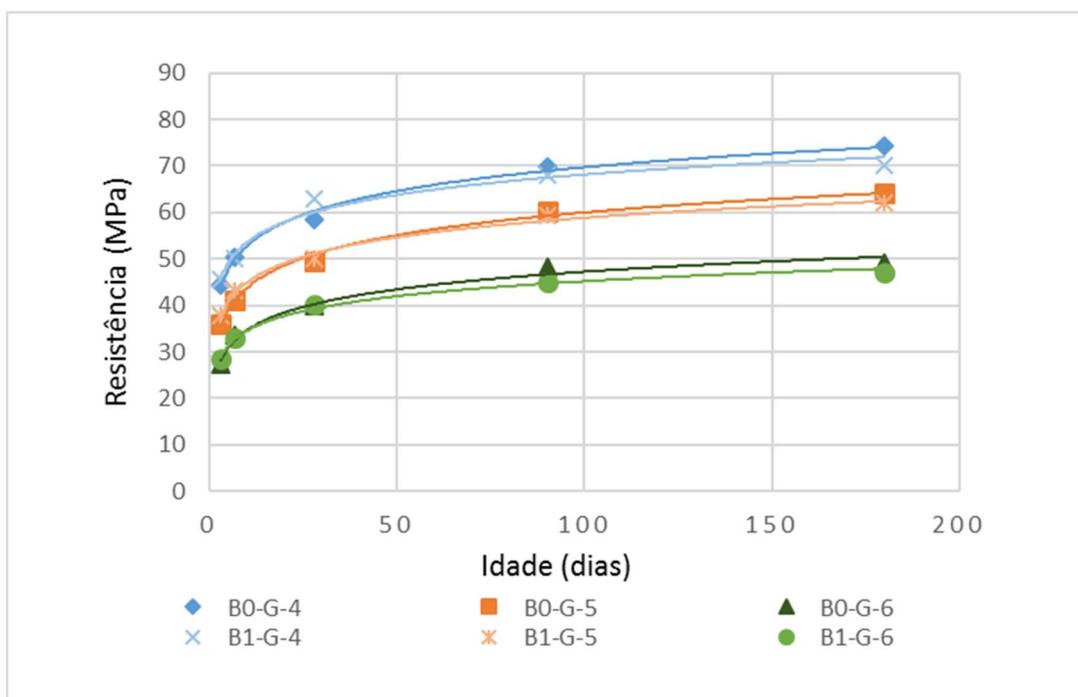
Na comparação realizada entre as DMC de 9,5mm das britas, figura 34, com os concretos de relações a/c de 0,4 e 0,5, a resistência foi em média 7,9% superior nos concretos em que se utilizou a pedra basalto, porém com a relação a/c de 0,6 pouco pode-se notar de variação das resistências obtidas em quaisquer idades. Os concretos produzidos com DMC de 19mm, figura 35, produzidos com pedra basalto tiveram resistências em média 12,7% superiores quando comparados aos que se utilizou a pedra granito.

Figura 32 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita basalto com as duas DMC utilizadas.



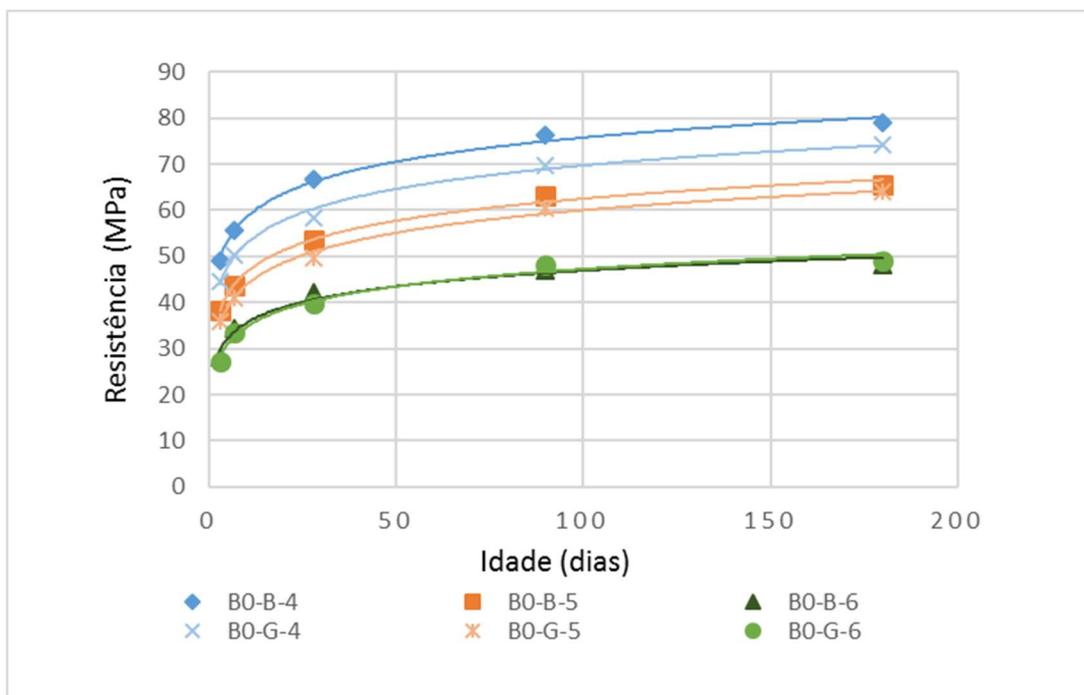
Fonte: Autor, 2017.

Figura 33 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita granito com as duas DMC utilizadas.



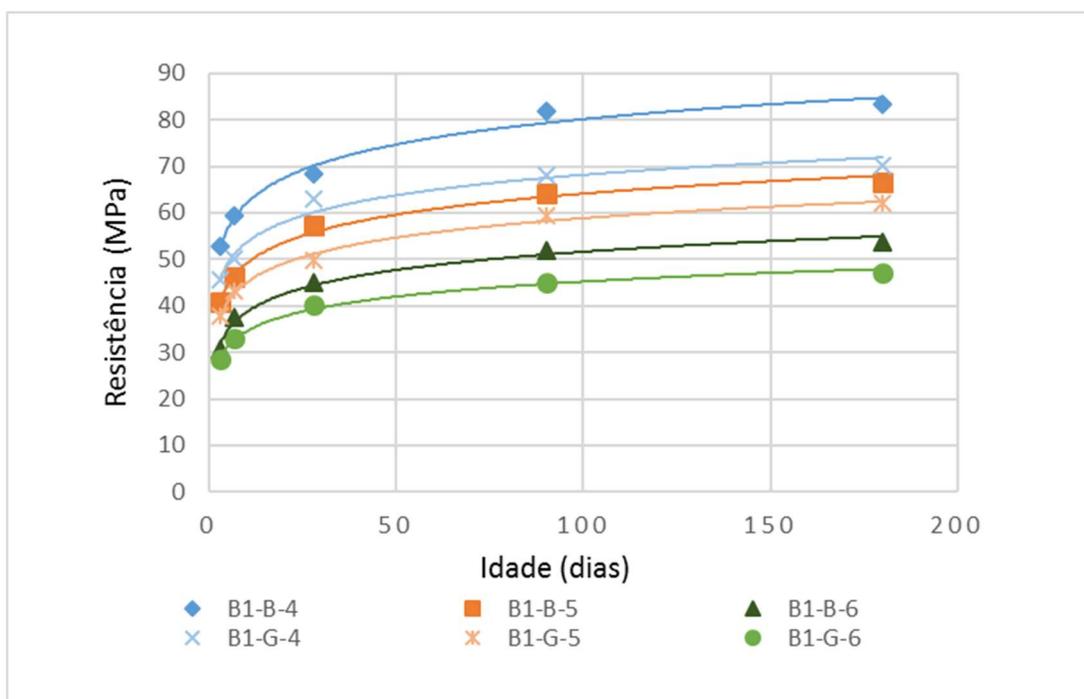
Fonte: Autor, 2017.

Figura 34 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B0.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 35 - Correlação entre resistências à compressão dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B1.



Fonte: Autor, 2017.

## 4.2. Módulo de elasticidade

A tabela 12 apresenta os valores médios de módulo de elasticidade de todos os concretos em cada uma das idades em que as amostras foram ensaiadas, bem como a relação entre o módulo de elasticidade na idade de ensaio relacionada ao valor encontrado na idade de 28 dias, sendo esta, considerada como 100%. A faixa de módulo de elasticidade aos 28 dias dos concretos B0-B foi de 32,50 a 34,31 GPa, dos concretos B1-B de 34,44 a 36,16 GPa, para os concretos B0-G foi de 30,57 a 32,94 GPa, e de 30,34 a 33,51 GPa para os concretos B1-G.

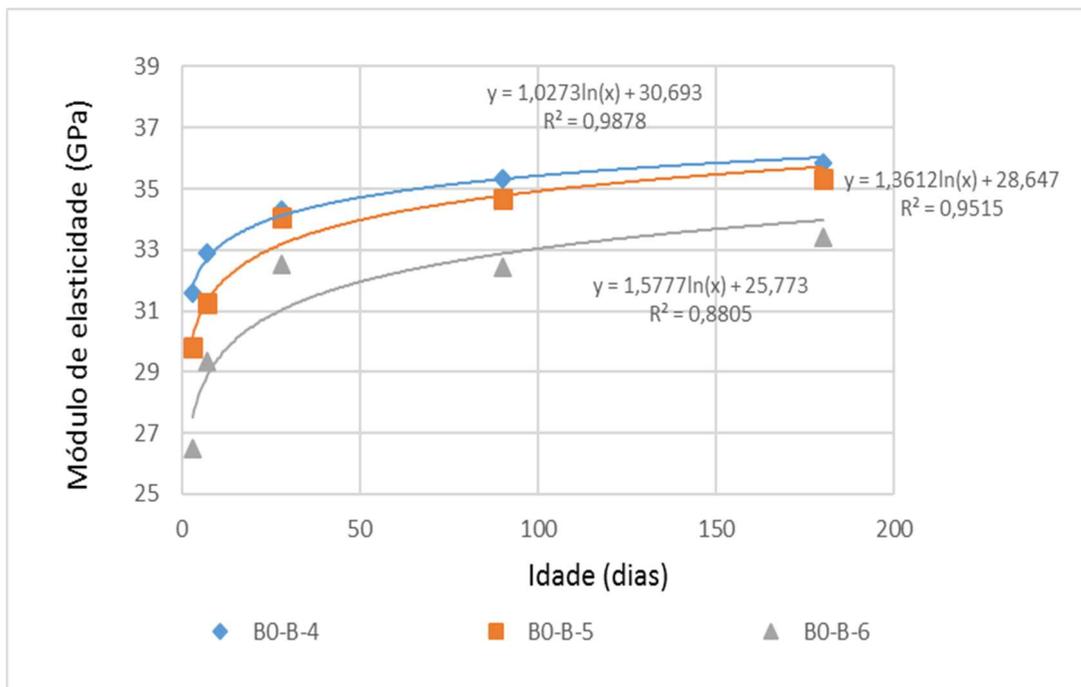
As figuras de 36 a 39 exibem os gráficos de ganho de módulo de elasticidade em função da idade dos concretos.

Tabela 12 - Resultados de módulo de elasticidade de todos os concretos.

TRAÇO	$E_{ci3}$ (MPa)	$E_{ci7}$ (MPa)	$E_{ci28}$ (MPa)	$E_{ci90}$ (MPa)	$E_{ci180}$ (MPa)	$E_{ci3}/E_{ci28}$	$E_{ci7}/E_{ci28}$	$E_{ci28}/E_{ci28}$	$E_{ci90}/E_{ci28}$	$E_{ci180}/E_{ci28}$
B0-B-4	31,59	32,87	34,31	35,34	35,86	92%	96%	100%	103%	105%
B0-B-5	29,79	31,25	34,08	34,66	35,33	87%	92%	100%	102%	104%
B0-B-6	26,50	29,36	32,50	32,45	33,41	82%	90%	100%	100%	103%
B1-B-4	32,25	35,64	36,16	37,27	37,97	89%	99%	100%	103%	105%
B1-B-5	32,42	32,30	33,51	35,93	35,61	97%	96%	100%	107%	106%
B1-B-6	31,01	31,61	34,44	35,15	35,52	90%	92%	100%	102%	103%
B0-G-4	28,39	29,80	31,26	32,44	32,16	91%	95%	100%	104%	103%
B0-G-5	28,55	30,98	32,94	34,48	34,35	87%	94%	100%	105%	104%
B0-G-6	25,82	28,37	30,57	33,83	33,83	84%	93%	100%	111%	111%
B1-G-4	29,78	31,93	33,51	33,91	33,17	89%	95%	100%	101%	99%
B1-G-5	29,55	31,31	32,83	33,67	33,57	90%	95%	100%	103%	102%
B1-G-6	27,63	28,74	30,34	32,58	32,39	91%	95%	100%	107%	107%

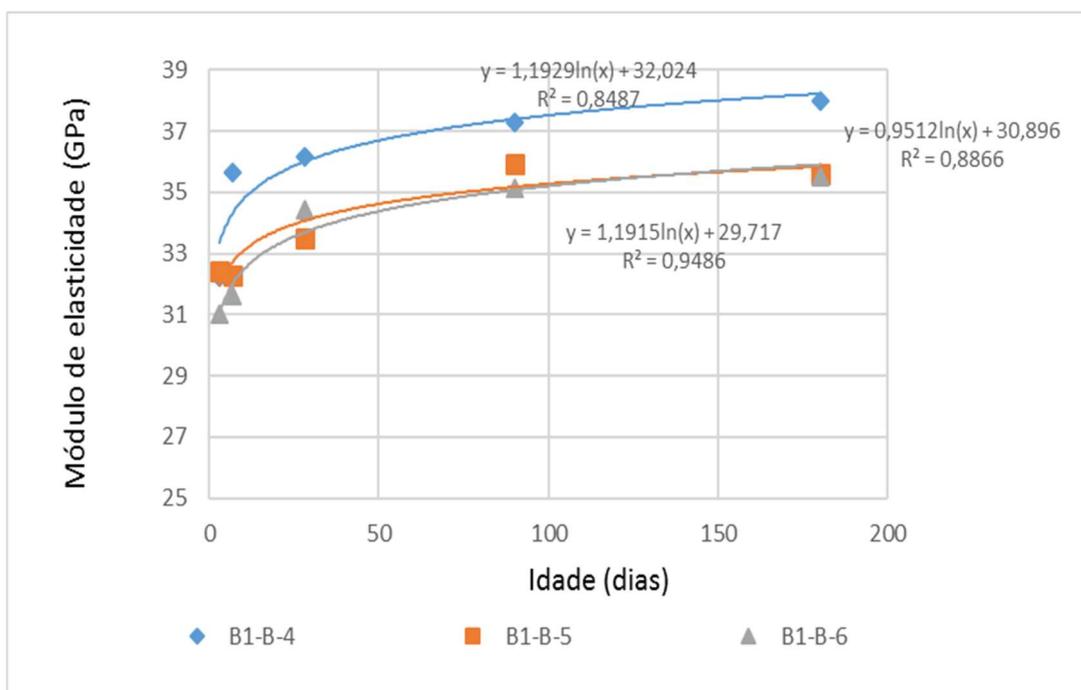
Fonte: Autor, 2017.

Figura 36 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B0-B.



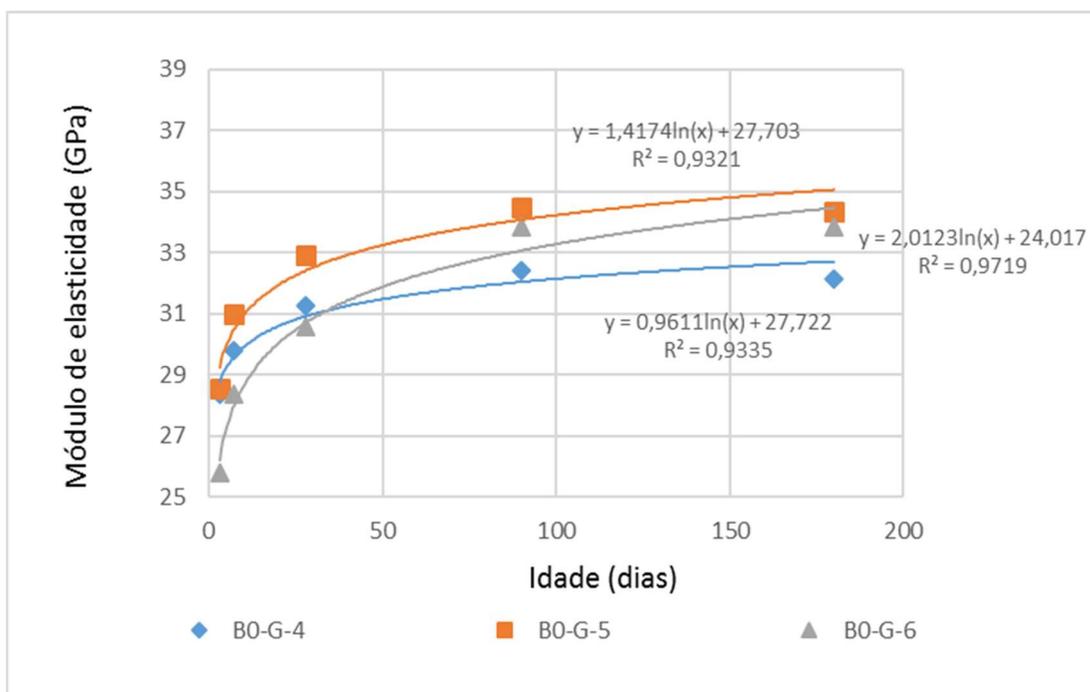
Fonte: Autor, 2017.

Figura 37 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B1-B.



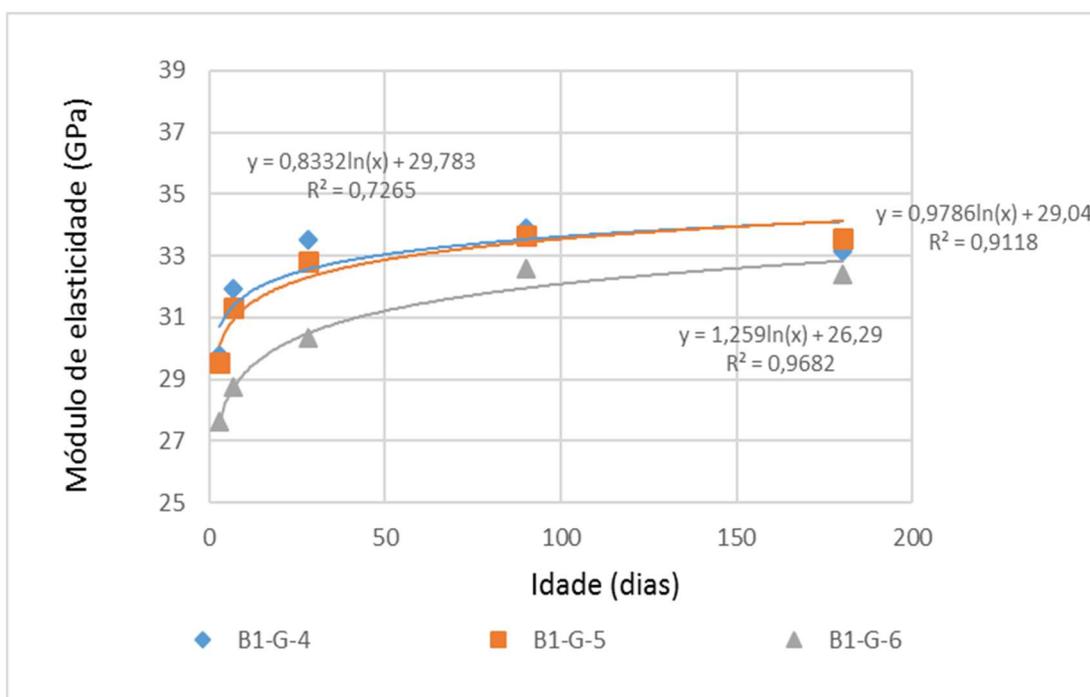
Fonte: Autor, 2017.

Figura 38 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B0-G.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 39 - Módulo de elasticidade em função da idade dos concretos B1-G.

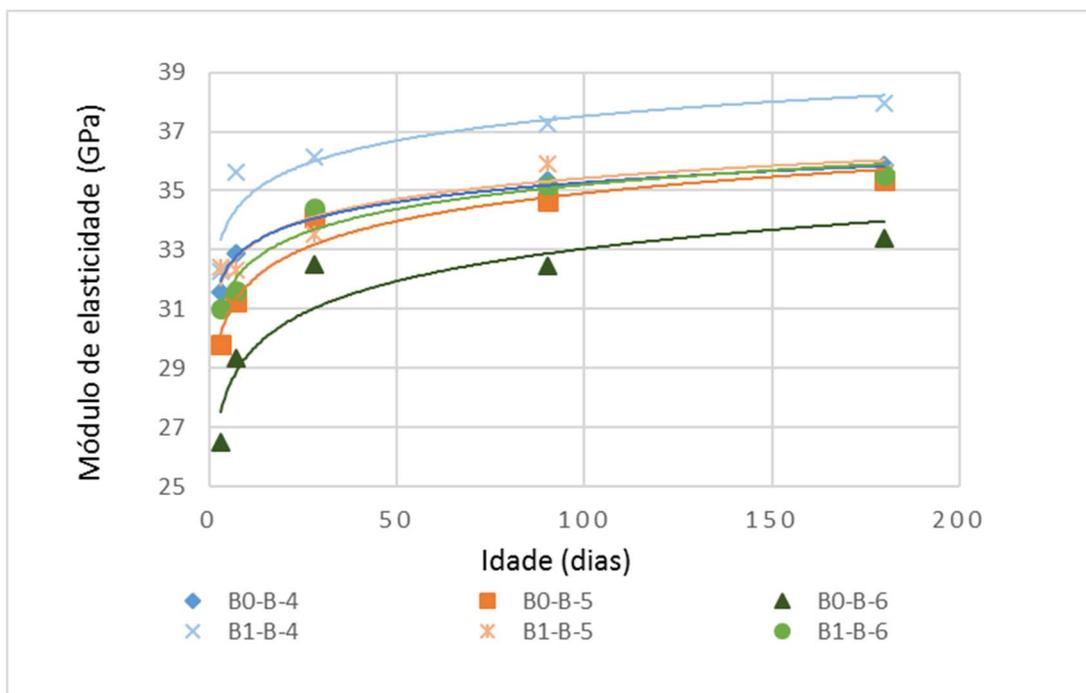


Fonte: Autor, 2017.

As figuras de 40 a 43 apresentam os resultados de módulo de elasticidade alternando entre comparações entre a mesma natureza do agregado graúdo, alterando a dimensão máxima característica, e diferente natureza do agregado graúdo, mantendo-se a dimensão máxima característica. Na figura 40, pode-se observar que o concreto produzido com brita basalto com DMC de 19mm teve em média módulo de elasticidade 5,8% maiores que os concretos produzidos com a DMC de 9,5mm. No caso dos concretos produzidos com brita granito, figura 41, o cenário foi o mesmo para a relação  $a/c$  de 0,4 registrando um aumento de cerca de 5,4% com o uso de brita 1. As demais relações  $a/c$ , 0,5 e 0,6, também apresentaram resultados maiores nos concretos produzidos com DMC de 19mm, porém, dos 28 dias em diante, isso se inverteu, fazendo com que os resultados obtidos pelo ensaio de módulo de elasticidade fossem maiores nos concretos com DMC de 9,5mm.

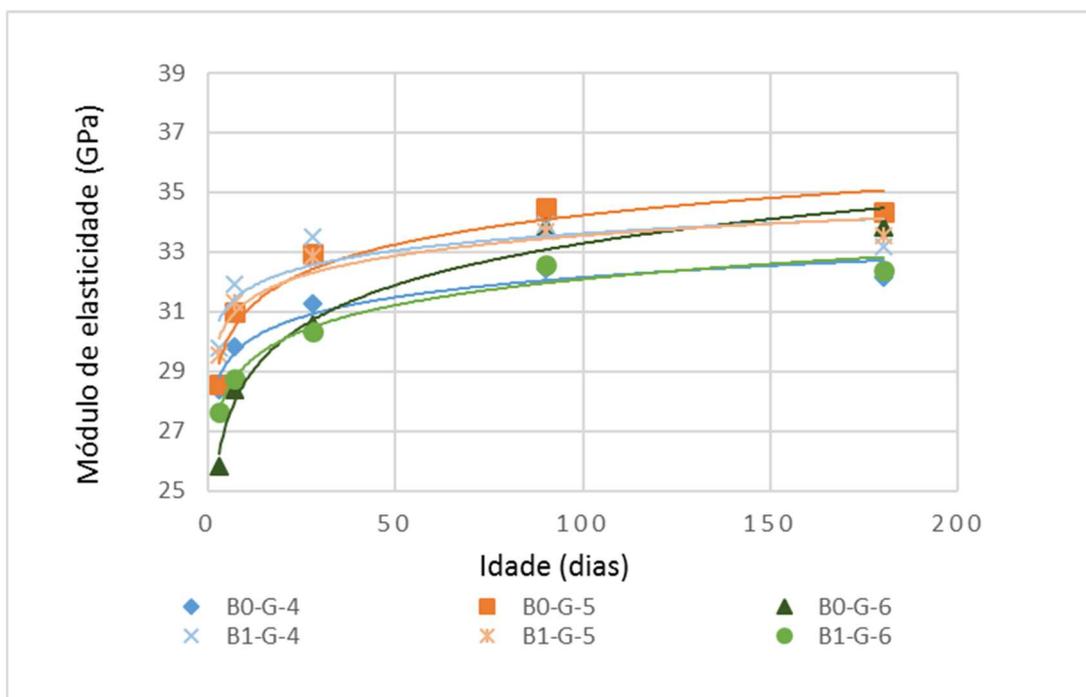
Na comparação realizada entre as DMC de 9,5mm das britas, figura 42, com os concretos de relações  $a/c$  de 0,4 e 0,5, o resultado do módulo de elasticidade foi em média 6,4% superior nos concretos em que se utilizou a pedra basalto, porém com a relação  $a/c$  de 0,6 pouco pode-se notar de variação dos valores obtidos em quaisquer idades. Os concretos produzidos com DMC de 19mm, figura 43, produzidos com pedra basalto tiveram valores de módulo de elasticidade em média 8,9% superiores quando comparados aos que se utilizou a pedra granito.

Figura 40 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita basalto com as duas DMC utilizadas.



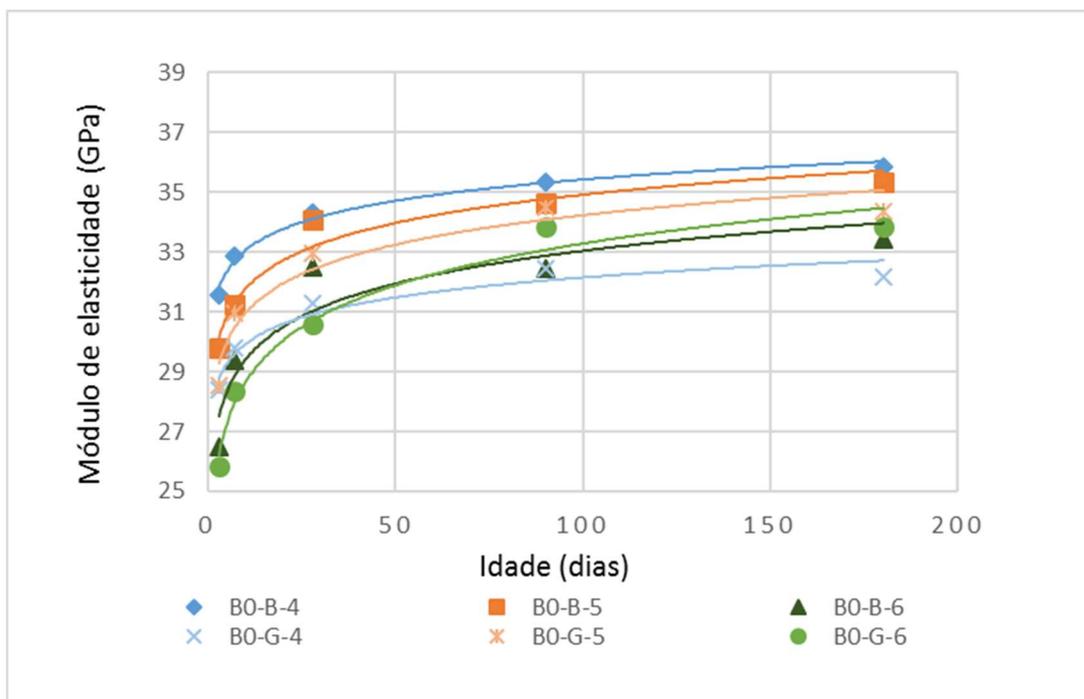
Fonte: Autor, 2017.

Figura 41 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita granito com as duas DMC utilizadas.



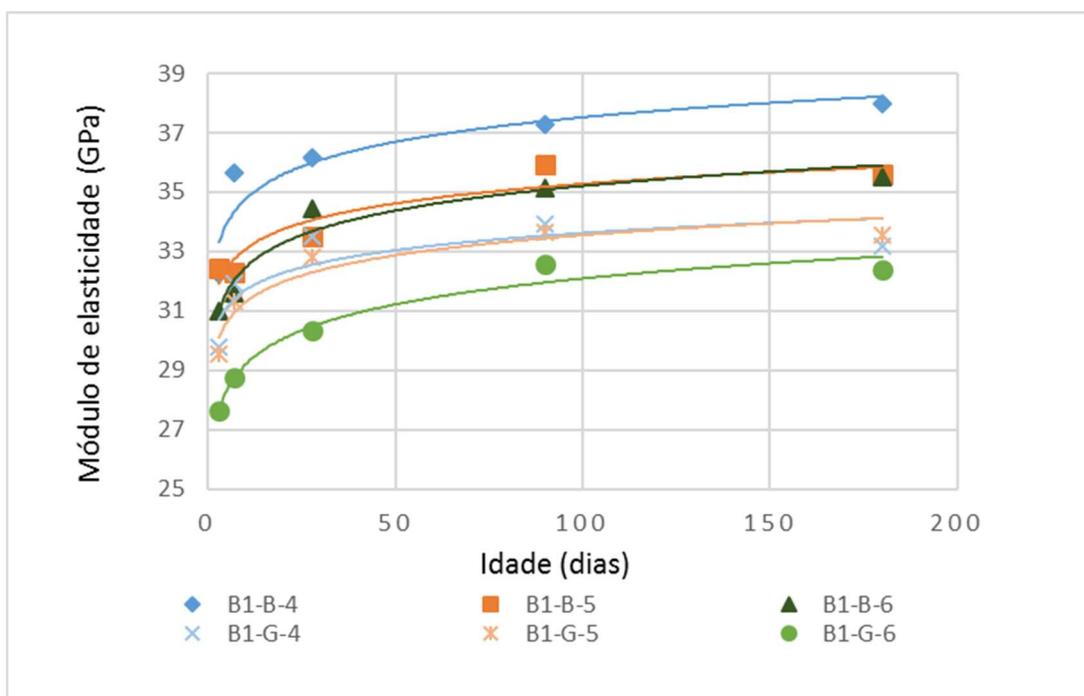
Fonte: Autor, 2017.

Figura 42 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B0.



Fonte: Autor, 2017.

Figura 43 - Correlação entre módulo de elasticidade dos concretos com brita granito e brita basalto utilizando B1.



Fonte: Autor, 2017.

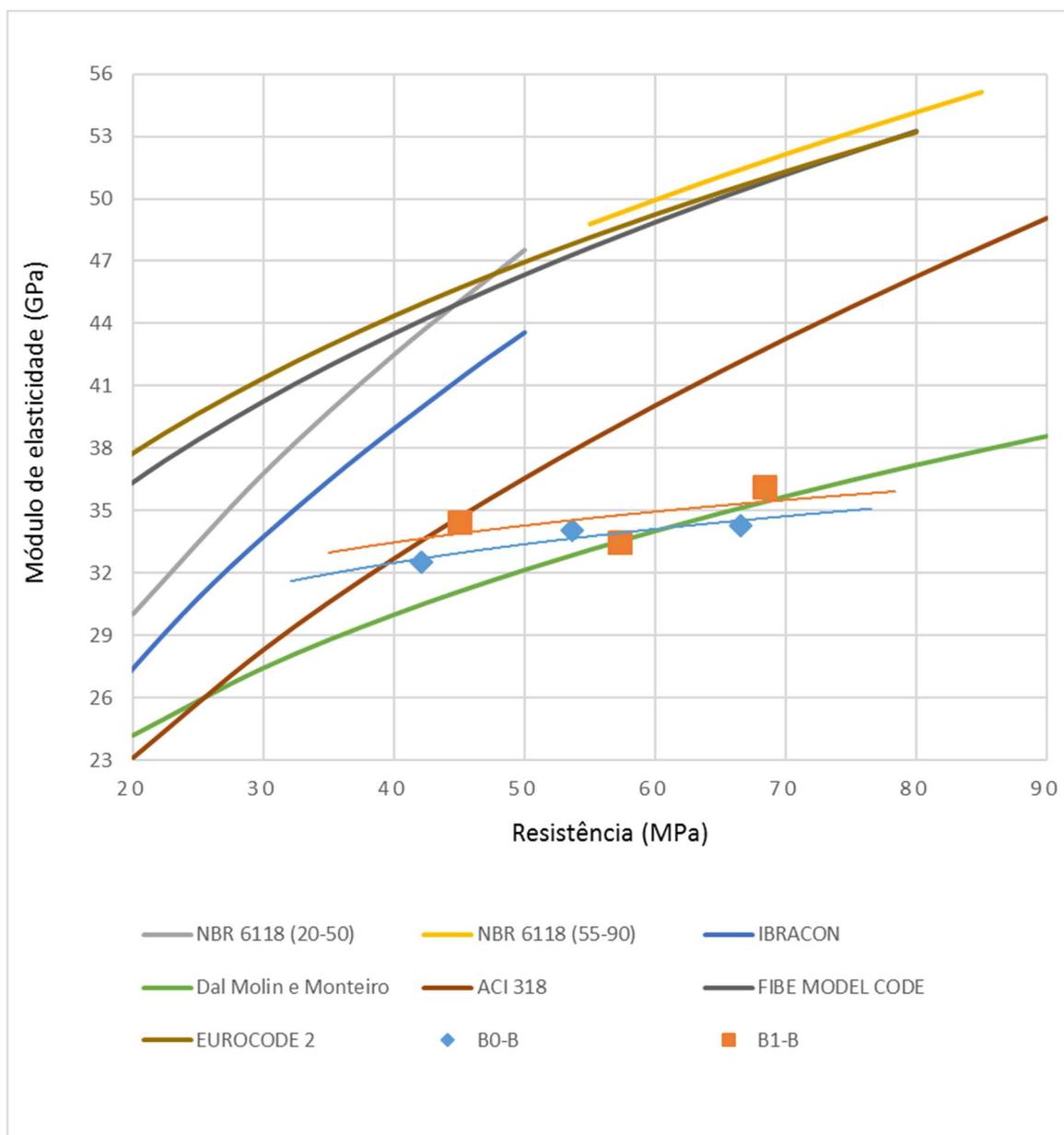
### **4.3. Relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.**

No que diz respeito a relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto é possível relacionar várias equações de diferentes autores que buscam encontrar um fator de conversão que defina diretamente a proporcionalidade que ocorre entre as duas características do material.

Foram relacionadas diversas equações que buscam encontrar uma relação aproximada do valor em que se encontra o módulo de elasticidade a partir da resistência a compressão. É possível analisar na figura 44, análise das estimativas devido aos resultados do concreto realizado com brita basalto, que a disparidade entre as equações é sem dúvida muito elevada, tornando pouco confiável uma possível relação entre as medidas. As equações da EUROCODE 2 (2004), NBR 6118 (2014) e da FIBE MODEL CODE (2010), se assemelham quanto aos valores propostos, as equações estimadas pelo IBRACON (2003) e ACI 318 (2014) apresentam discrepância tanto entre si quanto com as demais, enquanto as relações obtidas neste programa experimental se assemelham ao estudo realizado por Dal Molin e Monteiro (1996).

Se comparado aos valores propostos de módulo de elasticidade da NBR 6118 (2014) com os deste estudo, verifica-se que os resultados encontrados a partir dos ensaios apresentam diferenças de 19% a 33% menores que o valor do módulo de elasticidade estimado pela norma, sendo que esta diferença tende a aumentar a medida que a resistência a compressão aumenta.

Figura 44 - Correlações entre  $f_c$  e  $E_{ci}$  com utilização da brita basalto.

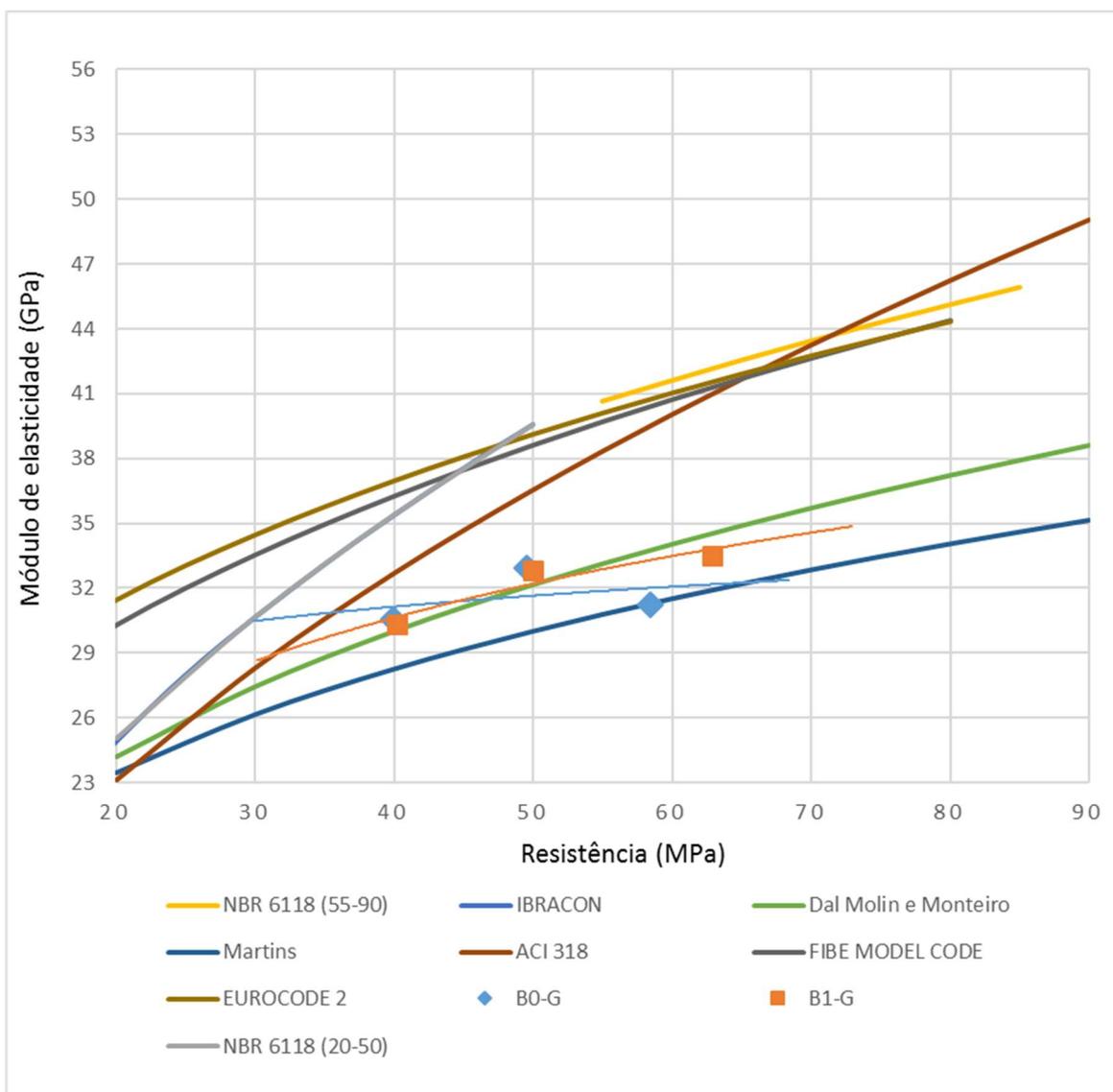


Fonte: autor, 2017.

Do mesmo modo, na figura 45, foi realizada a análise das estimativas por equações com os valores experimentais do concreto realizado com brita granito, devido ao fator de correção relacionado com a natureza do agregado variar em algumas das proposições. As equações da EUROCODE 2 (2004), NBR 6118 (2014), FIBE MODEL CODE (2010), IBRACON (2003) e ACI 318 (2014) se assemelham, as relações obtidas neste programa experimental são mais próximas ao estudo realizado por Dal Molin e Monteiro (1996) e por Martins (2008), que analisou concretos produzidos também com a brita granito.

Se comparado aos valores propostos de módulo de elasticidade da NBR 6118 (2014) com os deste estudo, os resultados encontrados a partir dos ensaios apresentam diferenças de 14% a 23% menores do que o valor de módulo de elasticidade das estimativas realizadas pela norma. Sendo que tal diferença, também, tende a aumentar com crescimento da resistência.

Figura 45 - Correlações entre  $f_c$  e  $E_{ci}$  com utilização da brita granito.



Fonte: autor, 2017.

#### 4.4. Análise de variância

Após a análise dos dados de forma bruta, verificou-se uma dificuldade em realizar afirmações de que alguma variável independente no traço ocasionou diferenças significativas nas propriedades mecânicas das misturas. Devido a isso, foi realizado um tratamento estatístico dos dados obtidos a fim de determinar uma significância das variações do módulo de elasticidade ao se alterar nas dosagens o tipo, dimensão, idade e relação a/c dos concretos desta pesquisa.

Na tabela 13, tem-se a análise de variância considerando 36 amostras por idade. Após tal constatação pode-se realizar a comparação múltipla de médias através do método de Tukey, com 95% de confiança, para determinar se os valores encontrados nas idades diferem entre si ou compartilham o mesmo intervalo comum dentro dos resultados obtidos, conforme figura 46.

Tabela 13 - Análise de variância (ANOVA) para idade em relação ao módulo de elasticidade.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	Fcalc.	PROB.	SIGN.
Idade	730,82	4	182,71	52,81	0,00%	S
Erro	605,48	175	3,46			
Total	1336,3	179				

Onde,

**SQ**=Soma dos quadrados;

**GL**=Graus de liberdade;

**MD**=Médias quadradas ;

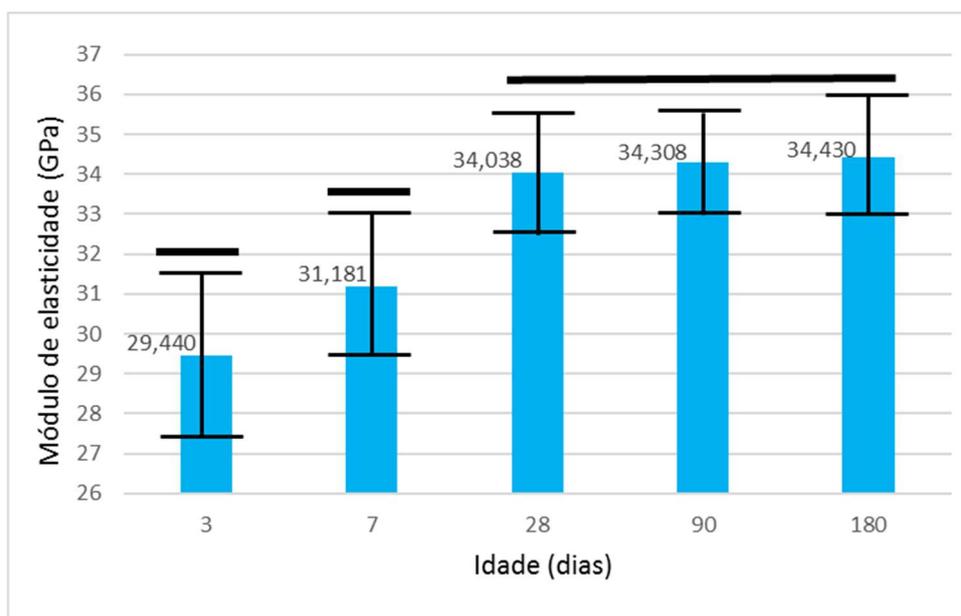
**Fcalc.**=Valor calculado de F;

**S**=Efeito **significativo**;

**NS**=Efeito **não significativo**;

Fonte: autor, 2017.

Figura 46 - Análise múltipla de médias e desvio padrão das idades em relação ao módulo de elasticidade.



Fonte: autor, 2017.

Com base na análise de variância pode-se comprovar, como esperado, de que a idade das amostras na data do ensaio é significativa quanto aos resultados obtidos de módulo de elasticidade. Outro fator preponderante a partir da análise múltipla de médias é de que os valores após 28 dias não apresentam diferença de média significativas, podendo-se assim utilizar tal idade como sendo característica ao valor de módulo do material, e proceder a análise dos demais fatores de comparação utilizando os resultados obtidos nessa data. Portanto, os dados analisados de módulo de elasticidade foram os obtidos na idade correspondente a 28 dias. Tal definição foi realizada, também, devido a especificação comum entre bibliografias que a idade correspondente para se obter as propriedades mecânicas do material é de 28 dias após o momento da mistura entre os materiais componentes do concreto.

Na tabela 14, tem-se a análise de variância, considerando 150 amostras por tipo e por dimensão do agregado graúdo. Após tal constatação pode-se realizar a comparação múltipla de médias através do método de Tukey, com 95% de confiança, para determinar se os valores encontrados referentes ao tipo e a dimensão diferem entre si ou compartilham o mesmo intervalo comum dentro dos resultados de módulo obtidos, conforme figura 47 e 48.

Tabela 14 - Análise de variância (ANOVA) para tipo e dimensão de agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	Fcalc.	PROB.	SIGN.
Tipo	45,946	1	45,946	25,41	0,0%	S
Dimensão	6,562	1	6,562	3,63	6,6%	NS
Erro	59,681	33	1,809			
<b>Total</b>	<b>112,189</b>	<b>35</b>				

Onde,

**SQ**=Soma dos quadrados;

**GL**=Graus de liberdade;

**MD**=Médias quadradas ;

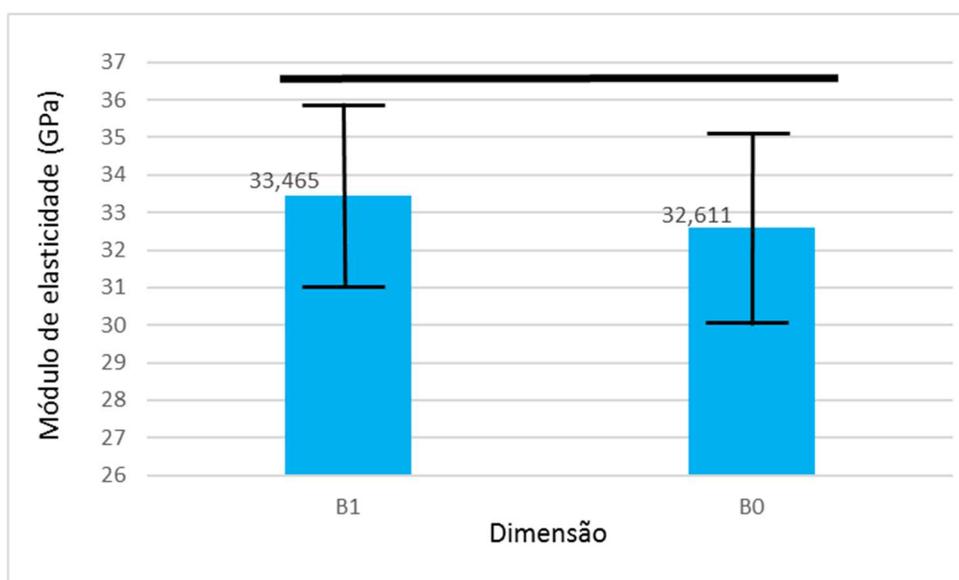
**Fcalc.**=Valor calculado de F;

**S**=Efeito **significativo**;

**NS**=Efeito **não significativo**;

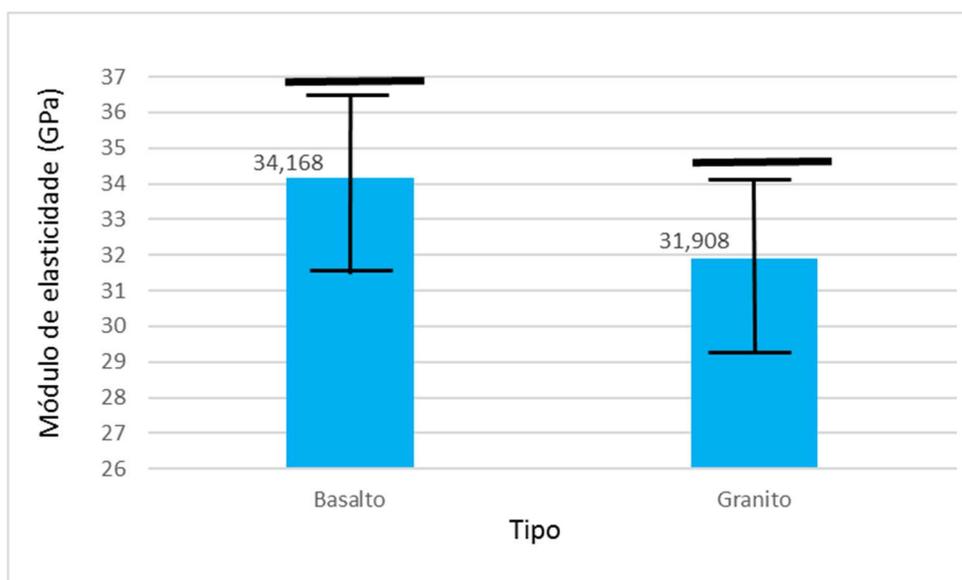
Fonte: autor, 2017.

Figura 47 - Análise múltipla de médias e desvio padrão da dimensão do agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade.



Fonte: autor, 2017.

Figura 48 - Análise múltipla de médias e desvio padrão do tipo de agregado graúdo em relação ao módulo de elasticidade.



Fonte: autor, 2017.

Conforme a análise de variância pode-se observar que, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a influência ao módulo de elasticidade devido ao tipo do agregado graúdo utilizado para a composição do concreto é significativa. Já a dimensão, não citada e, portanto, julgada como não relevante, realmente não exerce influência significativa aos valores de módulo determinados através dos ensaios. Tal evidência divide a mesma ideia com Pompeu (2004), que confirmou que as propriedades elásticas do concreto são influenciadas pelas propriedades elásticas dos materiais constituintes. Outrossim, junto ao que encontrou em experimentos Rohden (2011), demonstrando que a dimensão máxima característica do agregado graúdo não foi considerada significativa estatisticamente como um fator que influenciaria o resultado do módulo de elasticidade do concreto.

## 5. CONCLUSÃO

Baseado na análise dos resultados obtidos no programa experimental desenvolvido nessa pesquisa, onde se avaliou a influência da dimensão máxima característica no módulo de elasticidade do concreto, em diferentes dosagens onde se alteraram a relação a/c, dimensão e natureza do agregado graúdo, são apresentados neste capítulo conclusões e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema. Lembrando que as conclusões descritas neste capítulo são ligadas as características dos materiais utilizados e para a dosagem dos concretos desta pesquisa.

É possível constatar que os concretos produzidos com pedra basalto tiveram uma resistência à compressão levemente superior aos que tinham como componente a pedra granito. No caso das britas de 9,5mm e 19mm a resistência foi superior nos casos de uso da pedra basalto em 7,9% e 12,7%, respectivamente. Já, se utilizando a mesma pedra, no caso da mineralogia basáltica, a dimensão de 19mm foi 6,5% superior, enquanto o contrário ocorreu com a pedra granítica, onde a dimensão de 9,5mm foi 4,1% superior a maior dimensão utilizada.

Quanto ao módulo de elasticidade pode-se constatar, a partir da análise de variância, que ocorre uma alteração significativa em relação a natureza do agregado utilizado, porém a dimensão da pedra não é significativa quanto aos valores de módulo de elasticidade analisados. Pode-se notar isso também na análise dos dados brutos, onde concretos com a pedra basáltica superaram os com granítica nas dimensões de 9,5mm e 19mm, 6,4% e 8,9%, respectivamente. Tal ponto coincide com o fator de multiplicação superior, para conversão do valor de resistência a compressão em módulo de elasticidade da pedra basáltica comparada a granítica que traz a NBR 6118

(ABNT, 2014). Já a análise mantendo-se o tipo da pedra e alterando a dimensão, se tornou difícil devido aos valores próximos encontrados com os dados brutos.

Ao se estimar valores de módulo de elasticidade a partir da resistência a compressão, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) determina, uma discrepância elevada entre o estipulado pela norma e os valores reais de módulo de elasticidade encontrados foi detectada. Os valores estimados pela norma superestimam os que o material em si realmente apresentou, aumentando a discrepância gradativamente com o aumento da resistência. No caso dos concretos com a pedra basalto as diferenças entre os valores são de 19% a 33% maiores do que os obtidos através dos ensaios. Já no caso da pedra granito, devido ao fator de multiplicação menor, relacionado a natureza do agregado, as diferenças são menores, na ordem de 14% a 23%, porém com a mesma linha de tendência de aumento com o aumento da resistência a compressão.

É baseado nessas conclusões que se torna necessário um aprimoramento do controle tecnológico em obras para avaliar as propriedades dos materiais empregados. Necessariamente é viável, além de consultar as normas vigentes, realizar os ensaios específicos para cada tipo de material visto que a vasta gama de componentes das misturas de concreto pode influenciar de forma distinta as propriedades do produto ao decorrer do tempo.

Como sugestão à trabalhos futuros são sugeridas análises similares onde outros tipos de agregados, cimentos e adições sejam utilizados para a composição da mistura do concreto. Além da aplicação de diferentes métodos para obtenção dos parâmetros mecânicos do material para avaliação e comparação ao que bibliografias tem como fator de conversão da resistência a compressão em módulo de elasticidade do concreto.

## 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó –Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo –Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

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

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

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

BARBOSA, M. P.; et al, “**A influência do tipo de agregado graúdo nos módulos de elasticidade e na resistência a tração dos concretos de elevado desempenho**”, 41º Congresso Brasileiro de Concreto, IBRACON, Salvador - BA, agosto, 1999.

CARBONELL, Jordi Villardeli. **Estúdio relativo a la evaluaci3n experimental Del m3dulo de deformaci3n em hormig3n de presas**. Disserta3o (Mestrado). Escola T3cnica superior d' Enginyers de Camins Canals i ports de Barcelona. Barcelona, Espanha. 1996.

CASTRO, A. L. **Aplica3o de conceitos reol3gicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de S3o Carlos / Instituto de F3sica de S3o Carlos / Instituto de Qu3mica de S3o Carlos – Universidade de S3o Paulo, S3o Carlos, 2007.

CUNHA C. H. M. **Deformabilidade das estruturas de concreto: Impacto da variabilidade do m3dulo de elasticidade secante e da resist3ncia 3 tra3o, decorrente as modifica33es dos materiais, cimentos e agregados**. Disserta3o (Mestrado). Escola Polit3cnica da Universidade de S3o Paulo. S3o Paulo, 2000.

DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. **Contribui3o ao estudo do m3dulo de deforma3o de concretos de alta resist3ncia com e sem adi33es de microsil3ca**. S3o Paulo – SP, EPUSP, 1996.

EUROCODE 2: **Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings**. British standard. London: BSI, 2004.

FIB MODEL CODE. Lausanne: CEB, **Comite Euro-International du Beton**. 2010.

GUIMAR3ES,L.E.; SANTOS,D.R.;FIGUEIREDO,E.J.P., “ **Avalia3o do m3dulo de deforma3o do concreto em diferentes idades e com diferentes rela33es 3gua/cimento**” Revista “A constru3o em Goi3s” outubro de 1999.

HELENE, Paulo R.L.; MONTEIRO, Paulo J.M. **Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy**. Materials and Structures, v.26, n.162, Outubro, 1993, p.443-452.

IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto. **Prática Recomendada IBRACON - Comentários técnicos NB-1**. São Paulo, 2003.

KIHARA, Y; CENTURIONE, S.L., “**O cimento Portland- Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**”- IBRACON, 2005, São Paulo.

LI, G.; ZHAO, Y.; PANG, S.; LI, Y. **Effective young's modulus estimation of concrete. cement and concrete research**. v. 29 n. 9 p. 1455-1462, sep. 1999

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**. 4 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**” – 2ª Edição – Ed. Pini, São Paulo, 2013.

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

PACHECO, Ronaldo Feu Rosa. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na Grande Vitória. Experimentos e estatísticas**. Vitória – ES, UFES, 2006.

PEREIRA NETO, P. M., DJANIKIAN, J.G., “**A influência do tipo de agregado e da dimensão máxima característica nos módulos de elasticidade do concreto de alto desempenho**”, Revista IBRACON nº 12, São Paulo – SP, Abril, 1996

POMPEU, Bernardo Borges Neto. **Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo na resistência e energia de fratura do concreto**. São Paulo – SP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UNICAMP, 2004.

RODHEN, Abrahão Bernardo. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura**. Porto Alegre – RS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2015.

RODHEN, Abrahão Bernardo. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho**. Porto Alegre – RS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2011.

SALGADO, Julio. **Técnicas e práticas construtivas para edificação**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2015.

VIEIRA, Geilma Lima. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Porto Alegre – RS, Tese Doutorado, UFRGS, 2008.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.



**UNIVATES**

Rua Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil  
CEP 95900-000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000  
[www.univates.br](http://www.univates.br) | 0800 7 07 08 09