

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e
Infraestrutura

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES
PARÂMETROS DE DOSAGEM SOBRE O MÓDULO
DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO DE
CIMENTO PORTLAND**

RICARDO GIRARDI

Porto Alegre

2018

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS DE DOSAGEM SOBRE O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Orientação: Dr^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Coorientação: Dr^o Fernando Antônio Piazza Recena

RICARDO GIRARDI

Porto Alegre

2018

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS DE DOSAGEM SOBRE O MÓDULO DE DEFORMAÇÃO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Construção Civil e Infraestrutura, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2018.

Prof.^a Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. pela Universidade de São Paulo
Orientadora

Prof. Fernando Antônio Piazza Recena
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coorientador

Prof. Dr. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGCI/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Angela Borges Masuero (PPGCI/UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Fernanda Macedo Pereira (ULBRA)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Francieli Tiecher Bonsembiante (IMED)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CIP - Catalogação na Publicação

Girardi, Ricardo

Avaliação da Influência de Diferentes Parâmetros de Dosagem sobre o Módulo de Deformação do Concreto de cimento Portland / Ricardo Girardi. -- 2018.
238 f.

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Coorientador: Fernando Antônio Piazza Recena.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: construção e infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. módulo de deformação do concreto. 2. volume de pasta e agregados. 3. resistência à compressão. 4. tipo de cura. 5. tipo de agregado graúdo. I. Carpena Coitinho Dal Molin, Denise, orient. II. Piazza Recena, Fernando Antônio, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

*Aos que disseminam a cultura do saber ou
que simplesmente ouvem àqueles que detêm a
dúvida como pior inimigo...*

*Aos meus pais por conceberem a minha
essência...*

*Por todo apoio e amor, à Juliana Gregol
Sirtoli...*

AGRADECIMENTOS

Aquele que conduzir sozinho, de forma completa um trabalho, ou outra tarefa qualquer, jamais saberá quantificar a magnitude da bondade e gratidão, que as pessoas podem lhe proporcionar.

Não é justo apenas citar nomes, os quais fazem parte deste trabalho, de forma mais ampla, de quem teve o discernimento, de orientar, e até quem teve apenas ouvidos à escutar desabafos, ou até mesmo, quem não imaginava, o quão de dedicação isto mereceria. Portanto, deixo registrado agradecimento aos que, de uma forma ou outra, se envolveram até a contemplação deste estudo.

Ao NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, por todo o conhecimento repassado através de seus professores. Também, deixo um forte abraço aos colegas que tive nas diferentes disciplinas. Sigam fortes em busca dos seus objetivos.

Aos meus orientadores, Denise Carpena Coitinho Dal Molin e Fernando Antônio Piazza Recena, que sempre estiveram à disposição para discussões, correções, opiniões e críticas, de maneira sábia e concreta. Ter concluído este trabalho sob a supervisão de vocês, certamente é um privilégio que muitos gostariam de ter, pois o conhecimento repassado é imensurável. Também, devo ressaltar o caráter e a índole de vocês, obrigado por me espelhar o profissionalismo e a humildade.

Aos meus pais pelo que sou. No passado não tinham ideia do quão a graduação, o mestrado e doutorado eram importantes. Já, quando perceberam o real valor, não mediram esforço para incentivar e até mesmo realizarem suas intenções ocultas. Peço desculpas por estar longe, mas hoje a meta foi cumprida. Saibam que ao precisarem estarei aqui, distante fisicamente, porém, próximo de coração e espírito. Amo vocês!

Muito se aprende e pouco se sabe, em torno do amor. Talvez, amar seja o ato simples de doar-se, um ao outro. Obrigado por ser esta pessoa incrível. Vivíamos na mesma cidade, e hoje, distantes. É temporário. Te agradeço por tudo que faz por mim, mesmo longe. Peço que mantenha o foco e a conclua teu objetivo, pois

tudo é possível. Seja meu amparo, aqui ou em qualquer outro lugar no mundo. Continue doando-se, pois isso não é só amor, é alma – *Juliana Gregol Sirtoli*.

À Fundação de Ciência e Tecnologia (em extinção) – CIENTEC, onde tive a oportunidade de conduzir toda minha vida profissional até o momento, desde a época de estagiário. Reconheço o grande conhecimento repassado por todos os profissionais que de alguma forma fizeram parte de seu quadro técnico, em especial do Laboratório de Materiais de Construção Civil, o qual serei eternamente grato.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), a qual me acolheu logo após a conclusão da graduação, dando a oportunidade em fazer parte de seu quadro de docentes. Obrigado por permitir que eu semeie o pouco conhecimento que tenho junto à sociedade, por meio da formação de novos profissionais da engenharia civil. Em especial, agradeço aos laboratoristas Douglas Tischner Rodeghiero e José Eduardo Gerhardt da Luz que são o apoio direto no Laboratório de Materiais de Construção e nunca mediram esforços para me ajudar.

À Concreto e Pedreiras (CONCREPEDRA) empresa que doou todo o material (aglomerantes, agregados e aditivos) utilizado na reprodução dos concretos. Muito obrigado aos Engenheiros Adriano Fontana e ao Eduardo Tenn Pass.

À Pré-Concretos Engenharia que através do Diretor Engenheiro José Paulo Grings viabilizou a utilização do sistema de cura a vapor das amostras de concreto. Muito obrigado.

E por fim, não se esquecendo de maneira intencional, mas deixo aqui aos bons e aos maus professores, que cruzaram a minha trilha e de certa forma contribuíram para a minha vida pessoal e profissional, até os dias de hoje.

A vida esguicha como uma fonte àqueles
que perfuram a rocha da inércia...

Alexis Carrel

RESUMO

GIRARDI, R. **Avaliação da Influência de Diferentes Parâmetros de Dosagem sobre o Módulo de Deformação do Concreto de cimento Portland**. Tese de Doutorado em Engenharia – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção Civil e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre/RS. 238 fls, 2018.

Para o dimensionamento dos sistemas estruturais em concreto armado ou protendido é preciso conhecer, dentre outras propriedades, o módulo de deformação/elasticidade e a resistência à compressão, pelo menos. Entretanto, o concreto pode apresentar resistência suficiente, porém a rigidez da estrutura muitas vezes não é compatível com valores mínimos necessários para a verificação de possíveis deformação. A estimativa do módulo de deformação pode ser feita pela equação teórica da NBR 6118 (ABNT, 2014). Para isso, a bibliografia indica não haver confiança no modelo proposto, pois há superestimação dos valores e, em outras oportunidades, subestimação. Isso ocorre, pois o referido modelo tem como parâmetro de entrada somente a resistência à compressão do concreto. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta, de forma discreta e individualizada, o impacto produzido sobre o módulo de deformação de concretos convencionais de cimento Portland reproduzido por diversos parâmetros de dosagem: o volume de pasta, a resistência à compressão, o teor de argamassa, o tipo de agregado graúdo, o tipo de cura e a idade do concreto. Os resultados acusam a grande importância assumida pelos volumes de pasta e agregado, bem como a natureza do agregado graúdo sobre o módulo de deformação do concreto. Contrariamente ao encontrado na bibliografia, a resistência à compressão não se constitui como a principal variável interveniente no sistema.

Palavras-chave: *módulo de deformação do concreto; volume de pasta e agregados; resistência à compressão; tipo de cura; tipo de agregado graúdo.*

ABSTRACT

GIRARDI, R. **Evaluation of the Influence of Different Dosing Parameters on the Deformation Modulus of Concrete of cement Portland.** Doctorate in Engineering - Program Post-Graduate in Engineering Civil: Construction Civil and Infrastructure, UFRGS, Porto Alegre/RS. 238 pp, 2018.

For the design of structural systems in reinforced or prestressed concrete, it is necessary to know, among other properties, the modulus of deformation/elasticity and the compressive strength, at least. However, the concrete may have sufficient compressive strength, but the stiffness of the structure often is not compatible with the minimum values necessary for the verification of possible deformation. The estimation of the deformation modulus is done by the theoretical equation of NBR 6118 (ABNT, 2014). For this, the bibliography indicates that there is no confidence in the proposed model, because there is an overestimation of the values and, at other times, underestimation occurs. This is because the only input parameter is the compressive strength of the concrete. In this sense, the present work presents, in a discrete and individualized way, the impact produced on the modulus of deformation of conventional concretes of Portland cement reproduced by different parameters of dosage: paste volume, compressive strength, mortar content, the type of aggregate, the type of cure and the age of the concrete. The results accuse the great importance assumed by the paste and aggregate volumes, as well as the nature of the large aggregate on the concrete deformation modulus. Contrary to the literature, the compressive strength is not the main intervening variable in the system.

Keywords: *concrete deformation modulus; volume of paste and aggregates; compressive strength; type of cure; type of aggregate.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Deformação entre os átomos (Aguilar <i>et al.</i> , 2006)..... | 34 |
| Figura 2 - Deformação dos constituintes do concreto (Mehta e Monteiro, 2014) .. | 35 |
| Figura 3 - Efeito do carregamento na deformação do concreto (Mehta e Monteiro, 2014) | 36 |
| Figura 4 - Fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto (Mehta e Monteiro, 2014) | 38 |
| Figura 5 – Fonte de erro de leitura de deformação (Katayama, 2016)..... | 40 |
| Figura 6 – Efeito parede do concreto (Geyer e Greven, 1999)..... | 41 |
| Figura 7 – Série dos desvios-padrão dos Programas Interlaboratoriais de Concreto..... | 42 |
| Figura 8 – Série dos Coeficientes de Variação dos Programas Interlaboratoriais de Concreto..... | 43 |
| Figura 9 - Influência do diâmetro e da resistência na deformação específica (Del Viso, Carmona e Ruiz, 2008)..... | 46 |
| Figura 10 – Influência da dimensão do corpo de prova e da classe de resistência sobre o módulo de deformação (Martins, 2008)..... | 47 |
| Figura 11 – Influência da umidade da amostra no módulo de deformação ao longo do tempo (Neville, 1997) | 49 |
| Figura 12 – Influência da temperatura de cura no módulo de elasticidade (Elaborado com base em Han e Kim, 2004)..... | 51 |
| Figura 13 – Influência da planicidade na resistência à compressão (Bucher e Rodrigues Filho citado por Bezerra, 2007)..... | 52 |
| Figura 14 – Tipos de capeamento utilizados nos Programas Interlaboratoriais: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017) | 53 |
| Figura 15 – Corpos de prova somente retificados..... | 54 |
| Figura 16 – Corpos de prova retificados + Pasta de Enxofre | 54 |
| Figura 17 – Corpos de prova retificados + Argamassa com traço 1:1..... | 54 |
| Figura 18 – Corpos de prova retificados + Argamassa com traço 1:3..... | 54 |
| Figura 19 – Classe do equipamento de compressão: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017)..... | 56 |
| Figura 20 – Perturbação: deformação <i>versus</i> tensão (Pereira Neto citado por Montija, 2007)..... | 58 |
| Figura 21 – Tipo de acionamento do equipamento de compressão: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017) | 59 |
| Figura 22 – Influência da velocidade de carregamento (FURNAS, 1997)..... | 60 |
| Figura 23 – Influência do carregamento permanente na resistência à compressão: (a) $f_{ck} = 20$ MPa, (b) $f_{ck} = 30$ MPa e (c) $f_{ck} = 40$ MPa (Cândido, Borges e Bittencourt, 2007) | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 – Influência do carregamento permanente no módulo de elasticidade: (a) $f_{ck} = 20$ MPa, (b) $f_{ck} = 30$ MPa e (c) $f_{ck} = 40$ MPa (Cândido, Borges e Bittencourt, 2007) | 62 |
| Figura 25 – Distribuição dos esforços no corpo de prova (Kotsovovs e Pavlovic citado por Montija, 2007) | 63 |
| Figura 26 – Tipos de medidores de deformação utilizados nos Programas Interlaboratoriais: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017)..... | 65 |
| Figura 27 – <i>Clip Gages</i> (Montija, 2007; Cupertino <i>et al.</i> , 2007)..... | 65 |
| Figura 28 – <i>Strain Gages</i> (Montija, 2007; Cupertino <i>et al.</i> , 2007) | 65 |
| Figura 29 – <i>LVDT</i> (Montija, 2007) | 66 |
| Figura 30 – Compressômetros (Montija, 2007) | 66 |
| Figura 31 – Influência dos medidores de deformação (Araújo, Guimarães e Geyer, 2012) | 67 |
| Figura 32 - Microestrutura do concreto (Dal Molin, 1995) | 69 |
| Figura 33 – Influência da relação a/c no módulo de elasticidade: (a) (Melo Neto e Helene, 2002); (b) (Bauer, Pereira e Leal, 2012)..... | 78 |
| Figura 34 – Influência do consumo de cimento no módulo de elasticidade: (a) relação a/c constante; (b) abatimento constante (Melo Neto e Helene, 2002) | 79 |
| Figura 35 – Influência no módulo elasticidade: consumo de cimento com abatimento constante (Bauer, Pereira e Leal, 2012) | 79 |
| Figura 36 – Influência da resistência à compressão no módulo de deformação (Adaptado de Guimarães e Santos, 1999) | 82 |
| Figura 37 – Influência do teor de argamassa no módulo de elasticidade (Leal, 2012) | 84 |
| Figura 38 – Influência do teor de agregado graúdo no módulo de elasticidade (Adaptado de Myers, 2008)..... | 85 |
| Figura 39 – Influência da fração volumétrica do agregado graúdo no módulo de elasticidade para relação a/c: (a) 0,286 e (b) 0,296 (Adaptado de Yang <i>et al.</i> , 1995) | 86 |
| Figura 40 - Influência da rocha no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Kliszczewcz e Ajdukiewicz, 2002)..... | 88 |
| Figura 41 - Influência da rocha no módulo de deformação do concreto (Silva, 2003) | 89 |
| Figura 42 - Influência da rocha no módulo de elasticidade de CAD (Adaptado de Beushausen e Dittmer, 2015) | 89 |
| Figura 43 – Comparação experimental e empírica para o módulo de elasticidade (Adaptado de Myers, 2008)..... | 90 |
| Figura 44 – Influência de agregados do Estado do Goiás/GO no módulo de deformação do concreto (Costa e Prado, 2001)..... | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 45 – Influência de agregado do Estado do Rio de Janeiro/RJ no módulo de elasticidade do concreto (Nunes, 2005) | 91 |
| Figura 46 – Influência do granito proveniente de Vitória/ES no módulo de elasticidade do concreto: (a) $f_{ck} = 25$ MPa e (b) $f_{ck} = 30$ MPa (Pacheco, 2006) | 92 |
| Figura 47 – Influência de agregados do Estado de Minas Gerais/MG no módulo de deformação do concreto (Adaptado de Alhadass, 2008) | 93 |
| Figura 48 – Influência de agregados do Estado do Rio Grande do Sul/RS no módulo de elasticidade do concreto (Rohden, 2011) | 93 |
| Figura 49 – Influência dos agregados do Triângulo Mineiro/MG no módulo de elasticidade do concreto (Arruda, 2013)..... | 94 |
| Figura 50 – Influência dos agregados do Estado de São Paulo/SP no módulo de deformação do concreto (Bilesky, 2016) | 95 |
| Figura 51 – Influência de diferentes tipos de agregados no módulo de elasticidade do CCR (Ribeiro e Almeida, 2002) | 96 |
| Figura 52 – Influência de diferentes tipos de agregados no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Yildirim e Ozkan, 2011) | 96 |
| Figura 53 - Influência do teor de agregado reciclado no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Xian, Li e Zhang, 2005)..... | 97 |
| Figura 54 – Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Kummer, 2016)..... | 100 |
| Figura 55 – Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Yildirim e Ozkan, 2011) | 101 |
| Figura 56 – Influência da distribuição granulométrica e dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Li <i>et al.</i> , 1999)..... | 101 |
| Figura 57 – Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Rohden, 2011)..... | 102 |
| Figura 58 – Influência da dimensão máxima característica do agregado no módulo de elasticidade do concreto com $a/agl = 0,35$ (Adaptado de Pompeo Neto, Oliveira e Ramos, 2011)..... | 103 |
| Figura 59 – Influência da espessura da zona de transição no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Li <i>et al.</i> , 1999)..... | 105 |
| Figura 60 – Comparativo com a NBR 6118:2003 <i>versus</i> concretos de Minas Gerais/MG (Adaptado de Alhadass, 2008) | 112 |
| Figura 61 – Comparativo com a NBR 6118:2003 <i>versus</i> concretos do Rio de Janeiro/RJ (Nunes, 2005) | 113 |
| Figura 62 – Comparativo com a NBR 6118:2003 <i>versus</i> concretos de Goiânia/GO (Barbosa, 2009)..... | 114 |
| Figura 63 – Comparativo com a NBR 6118:2014 <i>versus</i> concretos de Lajeado/RS (Adaptado de Kummer, 2016) | 115 |

| | |
|---|-----|
| Figura 64 – Comportamento geral das equações internacionais comparando à NBR 6118:2014 (Bilesky, 2016) | 117 |
| Figura 65 – Comparativo entre concretos plásticos e autoadensável <i>versus</i> equações internacionais (Cabral, 2014)..... | 118 |
| Figura 66 – Comparação com normas internacionais: (a) ACI 318 (a) e (b) EUROCODE 2 (Adaptado de Alhadad, 2008) | 119 |
| Figura 67 – Planejamento do estudo..... | 124 |
| Figura 68 – MEV por elétrons secundários da cinza utilizada com aumentos de: (a) 1.000 vezes, (b) 2.000 vezes, (c) 4.000 vezes e (d) 10.000 vezes | 129 |
| Figura 69 – Difratoograma obtido da análise da cinza volante..... | 131 |
| Figura 70 – Brita de Granito | 142 |
| Figura 71 - Brita de Basalto..... | 142 |
| Figura 72 - Brita de Diabásio..... | 142 |
| Figura 73 - Volume de Pasta: influência do volume de pasta e de agregado sobre o módulo de deformação, nas diferentes idades..... | 151 |
| Figura 74 - Volume de Pasta: influência do consumo de cimento Portland no módulo de deformação..... | 152 |
| Figura 75 - Volume de Pasta: regressão para o módulo de deformação | 154 |
| Figura 76 - Volume de Pasta: regressão <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014) | 155 |
| Figura 77 - Volume de Pasta: regressão <i>versus</i> modelos propostos na bibliografia | 157 |
| Figura 78 - Resistência à Compressão: influência do teor de cinza no módulo de deformação | 159 |
| Figura 79 - Resistência à Compressão: influência da idade e do teor de cinza no módulo de deformação..... | 160 |
| Figura 80 - Resistência à Compressão: influência do teor de agregado no módulo de deformação, nas diferentes idades | 161 |
| Figura 81 - Resistência à Compressão: regressão para o módulo de deformação aos 14 dias..... | 163 |
| Figura 82 - Resistência à Compressão: regressão para o módulo de deformação aos 28 dias..... | 163 |
| Figura 83 - Resistência à Compressão: regressão para o módulo de deformação aos 150 dias..... | 164 |
| Figura 84 - Resistência à Compressão: equação de regressão <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014) | 165 |
| Figura 85 - Resistência à Compressão: regressão <i>versus</i> outros modelos propostos..... | 167 |
| Figura 86 - Teor de Argamassa: influência sobre o módulo de deformação nas diferentes idades | 169 |

| | |
|--|-----|
| Figura 87 - Teor de Argamassa: influência do teor de agregado sobre o módulo de deformação | 170 |
| Figura 88 - Teor de Argamassa: influência dos teores sobre o módulo de deformação, nas diferentes idades | 171 |
| Figura 89 - Teor de Argamassa: regressão para o módulo de deformação | 172 |
| Figura 90 - Teor de Argamassa: regressão <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014)..... | 174 |
| Figura 91 - Teor de Argamassa: regressão <i>versus</i> outros modelos propostos ... | 176 |
| Figura 92 - Tipo de Agregado Graúdo: influência da idade no módulo de deformação | 178 |
| Figura 93 - Tipo de Agregado Graúdo: influência da rocha no módulo de deformação | 179 |
| Figura 94 - Tipo de Agregado Graúdo: regressão para o módulo de deformação aos 14 dias..... | 181 |
| Figura 95 - Tipo de Agregado Graúdo: regressão para o módulo de deformação aos 28 dias..... | 181 |
| Figura 96 - Tipo de Agregado Graúdo: regressão para o módulo de deformação aos 150 dias..... | 182 |
| Figura 97 - Granito: regressão <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014)..... | 183 |
| Figura 98 - Basalto: regressão <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014) | 183 |
| Figura 99 - Diabásio: regressão <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014) | 183 |
| Figura 100 - Granito: equação de regressão <i>versus</i> modelos propostos na bibliografia..... | 186 |
| Figura 101 - Basalto: equação de regressão <i>versus</i> modelos propostos na bibliografia..... | 187 |
| Figura 102 - Diabásio: equação de regressão <i>versus</i> modelos propostos na bibliografia..... | 188 |
| Figura 103 - Tipo de Cura: influência sobre o módulo de deformação..... | 189 |
| Figura 104 - Tipo de Cura: influência da idade sobre o módulo de deformação . | 190 |
| Figura 105 - Cura Úmida: regressão para o módulo de deformação | 192 |
| Figura 106 - Cura a Vapor: regressão para o módulo de deformação | 193 |
| Figura 107 - Cura Úmida <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014) | 194 |
| Figura 108 - Cura a Vapor <i>versus</i> NBR 6118 (ABNT, 2014)..... | 194 |
| Figura 109 - Cura Úmida: equação de regressão <i>versus</i> outros modelos propostos | 195 |
| Figura 110 – Cura a Vapor: equação de regressão <i>versus</i> outros modelos propostos..... | 196 |
| Figura 111 – Módulo de Deformação: valores experimentais e obtidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 197 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Dados históricos da CIENTEC | 26 |
| Tabela 2 - Histórico de desvios-padrão dos Programas Interlaboratoriais de Concreto..... | 42 |
| Tabela 3 - Histórico dos Coeficientes de Variação dos Programas Interlaboratoriais de Concreto | 43 |
| Tabela 4 – Análise estatística dos diferentes tipos de capeamento para concreto $f_{ck} = 15$ MPa | 53 |
| Tabela 5 – Análise estatística dos diferentes tipos de capeamento para concreto $f_{ck} = 40$ MPa | 53 |
| Tabela 6 - Composição básica do cimento Portland brasileiro (NBR 16697, 2018) | 72 |
| Tabela 7 - Distribuição volumétrica e módulo de elasticidade dos compostos (Adaptado de Montija, 2007) | 75 |
| Tabela 8 - Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade com agregado de basalto (Adaptado de De Marchi <i>et al.</i> , 2010)..... | 80 |
| Tabela 9 - Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade com agregado de granito (Adaptado de De Marchi <i>et al.</i> , 2010)..... | 80 |
| Tabela 10 - Módulo de elasticidade de rochas (Elaborado com base em Falcão Bauer (1994), Frazão (2002) e Sbrighi Neto (2005))..... | 87 |
| Tabela 11 – Estudos regionalizados no Brasil..... | 90 |
| Tabela 12 - Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Pereira Neto e Djanikian, 1995) | 102 |
| Tabela 13 – Evolução da equação normativa da NBR 6118 | 111 |
| Tabela 14 – Equações normativas internacionais para módulo de elasticidade e deformação | 116 |
| Tabela 15 – Equações experimentais propostas por diversos autores | 120 |
| Tabela 16 – Caracterização física do cimento Portland | 126 |
| Tabela 17 – Resistência à compressão do cimento Portland..... | 127 |
| Tabela 18 – Diâmetro e superfície específica BET do cimento | 127 |
| Tabela 19 – Composição química quantitativa do cimento | 128 |
| Tabela 20 – Índices físicos cinza volante | 128 |
| Tabela 21 – Diâmetro e superfície específica BET da cinza | 129 |
| Tabela 22 – Composição química quantitativa da cinza | 130 |
| Tabela 23 – Atividade pozolânica com cal | 131 |
| Tabela 24 – Atividade pozolânica com cimento | 132 |
| Tabela 25 – Composição granulométrica: areia natural e basalto..... | 132 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 26 – Massa específica absoluta, massa unitária e material pulverulento | 133 |
| Tabela 27 – Resistência à compressão e módulo de deformação das rochas.... | 134 |
| Tabela 28 – Traços reproduzidos: volume de pasta..... | 138 |
| Tabela 29 - Resultados e índices calculados para o volume de pasta | 138 |
| Tabela 30 - Resultados da ANOVA para influência do volume de pasta | 139 |
| Tabela 31 – Traços reproduzidos: resistência à compressão | 139 |
| Tabela 32 - Resultados e índices calculados para a resistência à compressão.. | 139 |
| Tabela 33 - Resultados da ANOVA para influência da resistência à compressão | 140 |
| Tabela 34 – Traços reproduzidos: teor de argamassa | 140 |
| Tabela 35 - Resultados e índices calculados para o teor de argamassa | 141 |
| Tabela 36 - Resultados da ANOVA para teor de argamassa | 141 |
| Tabela 37 – Traços reproduzidos: tipo do agregado graúdo | 142 |
| Tabela 38 - Resultados e índices calculados para o tipo do agregado graúdo ... | 143 |
| Tabela 39 - Resultados da ANOVA para o tipo do agregado graúdo no módulo de deformação | 143 |
| Tabela 40 – Volume de Pasta: traços reproduzidos | 144 |
| Tabela 41 – Resistência à compressão: traços reproduzidos | 145 |
| Tabela 42 – Teor de Argamassa: traços reproduzidos..... | 146 |
| Tabela 43 – Tipo de Agregado Graúdo: traços reproduzidos..... | 147 |
| Tabela 44 – Tipo de Cura: traços produzidos..... | 148 |
| Tabela 45 – Volume de Pasta: resultados obtidos | 150 |
| Tabela 46 – Volume de Pasta: resultados da ANOVA | 153 |
| Tabela 47 – Volume de Pasta: agrupamento de médias pelo teste de Duncan .. | 153 |
| Tabela 48 – Volume de Pasta: agrupamento de médias pelo teste de Duncan para a idade | 154 |
| Tabela 49 – Volume de Pasta: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e à pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 155 |
| Tabela 50 – Volume de pasta: erro relativo na determinação do módulo de deformação por meio da equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 156 |
| Tabela 51 – Volume de Pasta: comparação entre valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos propostos na bibliografia..... | 157 |
| Tabela 52 – Resistência à Compressão: resultados obtidos..... | 158 |
| Tabela 53 – Resistência à Compressão: resultados da ANOVA..... | 162 |
| Tabela 54 – Resistência à Compressão: agrupamento de médias para o teor de cinza volante | 162 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 55 – Resistência à Compressão: agrupamento de médias para a idade | 162 |
| Tabela 56 – Resistência à Compressão: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 165 |
| Tabela 57 – Resistência à Compressão: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com equações da bibliografia | 167 |
| Tabela 58 – Teor de Argamassa: resultados obtidos | 169 |
| Tabela 59 – Teor de Argamassa: resultados da ANOVA | 171 |
| Tabela 60 – Teor de Argamassa: agrupamento de médias pelo teste de Duncan para a idade | 172 |
| Tabela 61 – Teor de Argamassa: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 173 |
| Tabela 62 – Teor de Argamassa: erro relativo na determinação do módulo de deformação por meio da equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 175 |
| Tabela 63 – Teor de Argamassa: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia | 175 |
| Tabela 64 – Tipo de Agregado Graúdo: resultados obtidos | 177 |
| Tabela 65 – Tipo de Agregado Graúdo: resultados da ANOVA | 179 |
| Tabela 66 – Tipo de Agregado Graúdo: agrupamento de médias | 180 |
| Tabela 67 – Tipo de Agregado Graúdo: agrupamento de médias para a idade | 180 |
| Tabela 68 – Tipo de Agregado Graúdo: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 182 |
| Tabela 69 – Tipo de Agregado Graúdo: determinação do fator de correção | 184 |
| Tabela 70 – Granito: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia | 185 |
| Tabela 71 – Basalto: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia | 186 |
| Tabela 72 – Diabásio: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia | 187 |
| Tabela 73 – Tipo de Cura: resultados obtidos | 189 |
| Tabela 74 – Tipo de Cura: resultados da ANOVA | 191 |
| Tabela 75 – Tipo de Cura: agrupamento de médias pelo teste de Duncan para a idade | 192 |
| Tabela 76 – Tipo de Cura: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014) | 193 |
| Tabela 77 – Tipo de Cura: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia | 195 |

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ACI - American Concrete Institute
ASTM - American Society for Testing and Materials
a/c – Relação água/cimento
a/agl – Relação água/aglomerante
CAD – Concreto de Alto Desempenho
CCR – Concreto Compactado a Rolo
CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia
 $C_{\text{teórico}}$ – Consumo teórico de cimento (kg/m^3)
CT 01 – Comissão Técnica 01: Construção Civil
CV – Coeficiente de Variação
D.P – Desvio-padrão
ELS – Estado de Limite de Serviço
EUA – Estados Unidos da América
 E_{ci} – Módulo de elasticidade do concreto
 E_{cs} – Módulo de deformação secante do concreto
 f_c – Resistência à compressão
 $f_{c,ef}$ - Resistência à compressão efetiva
 f_{cm} - Resistência à compressão média
 f_{ck} – Resistência característica à compressão
H (%) – Teor de água sobre materiais secos
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia
LabCEMM - Laboratório Central de Microscopia e Microanálise
LACER - Laboratório de Materiais Cerâmicos
LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT - Linear Variable Differential Transformer
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
 α (%) – Teor de argamassa anidro, em massa

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| LISTA DE FIGURAS | 11 |
| LISTA DE TABELAS | 16 |
| LISTA DE ABREVIATURAS | 16 |
| 1 INTRODUÇÃO | 23 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA | 25 |
| 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA | 29 |
| 1.2.1 Objetivo geral | 29 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 29 |
| 1.3 DELIMITAÇÕES | 30 |
| 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA | 30 |
| 2 DEFORMAÇÕES DO CONCRETO | 32 |
| 2.1 RELAÇÃO TENSÃO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO | 33 |
| 2.2 VARIABILIDADE DO ENSAIO DE MÓDULO | 38 |
| 2.2.1 Variações no ensaio devidas à amostra | 44 |
| 2.2.1.1 Dimensões dos corpos de prova | 45 |
| 2.2.1.2 Umidade e Temperatura | 48 |
| 2.2.1.3 Preparação das bases | 52 |
| 2.2.2 Máquina de ensaio | 56 |
| 2.2.2.1 Capacidade e acionamento do equipamento | 57 |
| 2.2.2.2 Velocidade de carregamento | 59 |
| 2.2.3 Medidores de deformação | 63 |
| 2.2.3.1 Base de medidas | 64 |
| 2.2.3.2 Tipos de medidores | 64 |
| 2.3 VARIABILIDADE DA DOSAGEM DOS MATERIAIS | 68 |
| 2.3.1 A Pasta | 70 |
| 2.3.1.1 Hidratação do cimento Portland | 72 |
| 2.3.1.2 Volume de pasta | 76 |
| 2.3.2 O agregado | 83 |
| 2.3.2.1 Tipo de agregado graúdo | 87 |
| 2.3.2.2 Composição granulométrica | 98 |
| 2.3.3 A zona de transição | 104 |
| 2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO CAPÍTULO | 107 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3 | PREDIÇÃO DO MÓDULO | 110 |
| 3.1 | NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA..... | 111 |
| 3.2 | NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL..... | 116 |
| 3.3 | OUTROS MODELOS PROPOSTOS..... | 119 |
| 3.4 | CONSIDERAÇÕES GERAIS DO CAPÍTULO | 122 |
| 4 | PROGRAMA EXPERIMENTAL | 124 |
| 4.1 | MATERIAIS EMPREGADOS NO ESTUDO | 126 |
| 4.1.1 | Cimento Portland | 126 |
| 4.1.2 | Cinza volante | 128 |
| 4.1.3 | Agregados..... | 132 |
| 4.2 | PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA..... | 134 |
| 4.3 | ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO | 135 |
| 4.3.1 | Abatimento pelo tronco de cone..... | 136 |
| 4.3.2 | Resistência à compressão | 136 |
| 4.3.3 | Módulo de deformação do concreto | 136 |
| 4.4 | PRIMEIRA FASE | 137 |
| 4.4.1 | Volume de Pasta..... | 138 |
| 4.4.2 | Resistência à Compressão | 139 |
| 4.4.3 | Teor de Argamassa..... | 140 |
| 4.4.4 | Tipo de Agregado Graúdo..... | 141 |
| 4.5 | SEGUNDA FASE | 143 |
| 4.5.1 | Volume de Pasta..... | 144 |
| 4.5.2 | Resistência à Compressão | 144 |
| 4.5.3 | Teor de Argamassa..... | 145 |
| 4.5.4 | Tipo de Agregado Graúdo..... | 146 |
| 4.5.5 | Tipo de Cura | 147 |
| 5 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 149 |
| 5.1 | VOLUME DE PASTA..... | 149 |
| 5.1.1 | Análise de Variância..... | 152 |
| 5.1.2 | Equação de Regressão..... | 154 |
| 5.1.3 | Comparação com Outros Modelos Propostos..... | 156 |
| 5.2 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO..... | 158 |
| 5.2.1 | Análise de Variância..... | 161 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2.2 | Equação de regressão | 163 |
| 5.2.3 | Comparação com outros modelos propostos | 166 |
| 5.3 | TEOR DE ARGAMASSA | 168 |
| 5.3.1 | Análise de Variância..... | 171 |
| 5.3.2 | Equação de regressão | 172 |
| 5.3.3 | Comparação com outros modelos propostos | 175 |
| 5.4 | TIPO DE AGREGADO GRAÚDO..... | 176 |
| 5.4.1 | Análise de Variância..... | 179 |
| 5.4.2 | Equação de regressão | 181 |
| 5.4.3 | Comparação com outros modelos propostos | 185 |
| 5.5 | TIPO DE CURA | 188 |
| 5.5.1 | Análise de Variância..... | 191 |
| 5.5.2 | Equação de regressão | 192 |
| 5.5.3 | Comparação com outros modelos propostos | 195 |
| 5.6 | COMPARAÇÃO GERAL COM A PROPOSTA DA NBR 6118:2014..... | 197 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 199 |
| 6.1 | CONCLUSÕES | 199 |
| 6.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 201 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 202 |
| | APÊNDICE A – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: VOLUME DE PASTA .. | 216 |
| | APÊNDICE B – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | 216 |
| | APÊNDICE C – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: TEOR DE ARGAMASSA | 217 |
| | APÊNDICE D – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: TIPO DO AGREGADO GRAÚDO | 217 |
| | APÊNDICE E – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: VOLUME DE PASTA .. | 218 |
| | APÊNDICE F – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | 221 |
| | APÊNDICE G – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: TEOR DE ARGAMASSA | 226 |
| | APÊNDICE H – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: TIPO DO AGREGADO GRAÚDO | 231 |
| | APÊNDICE I – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: TIPO DE CURA | 236 |

1 INTRODUÇÃO

O concreto convencional de cimento Portland é o material que, em sua concepção mais simples, é formado apenas por cimento Portland, agregados, miúdo e graúdo, e água.

O estudo de dosagem racional de concreto, em tese, visa a definição de uma quantidade de pasta necessária e suficiente ao preenchimento do volume de vazios deixado pelo agregado miúdo e, no mesmo sentido, um teor de argamassa capaz de ocupar os espaços vazios ocasionados pela estrutura granular do agregado graúdo, fruto da distribuição granulométrica, da forma e textura dos grãos. Por outro lado, a consistência e a coesão, que determinam a trabalhabilidade requerida para o concreto, são definidas pela fluidez e limitadas pela tendência à segregação. Assim, na pasta e na argamassa, deverá ser prevista uma quantidade excedente para garantir o afastamento entre os grãos, permitindo sua mobilidade relativa.

Além das características no estado fresco, o concreto tem sua avaliação feita pelas propriedades apresentadas no estado endurecido. A resistência mecânica com maior destaque.

Lenta e gradualmente, a resistência à compressão do concreto foi sendo elevada como referência em projetos estruturais, devido ao refinamento dos procedimentos de cálculo, e também pelo desenvolvimento da cadeia da construção civil como um todo. O cimento foi alvo de grandes investimentos em pesquisa, paralelamente à natural evolução tecnológica no processo de fabricação, desde a melhor especificação dos materiais usados como matéria prima, até o aprimoramento dos processos de queima, principalmente com relação ao controle de temperatura. A moagem é fundamental e, assim, o sistema via úmida foi substituído pelo processo via seca. Também, com base nas características químicas da argila utilizada na produção, essa pode passar por correções através da inserção de óxido de ferro, na forma de minério, sílica pura e outra fonte qualquer de alumina durante a dosagem, permitindo, dessa maneira, maior qualidade e controle da composição química do clínquer.

O que se pretende com essas colocações de caráter geral é apenas apresentar uma rápida retrospectiva para consubstanciar a adoção, atualmente, de resistências mais elevadas nos projetos de concreto armado. Nos anos de 1970 a referência de resistência característica à compressão (f_{ck}) estava situada entre 11,5 MPa e 18 MPa. Em algumas décadas a resistência passou a um patamar representado por valores definidos entre 30 MPa e 50 MPa, corriqueiramente, permitindo a construção de estruturas mais esbeltas, maiores vãos livres e alturas.

Outro fator determinante da elevação da resistência à compressão em projetos foi, sem dúvida, a busca por concretos de maior durabilidade o que, na obrigação de serem empregadas menores relações água/cimento, condicionou a elevação da resistência mecânica.

Classicamente, desde a formulação da lei de Abrams em 1918, e, sob certos aspectos, ainda hoje em dia, a resistência mecânica é o principal parâmetro de entrada para o cálculo de traços em dosagens de concretos. Outras características foram sempre consequência, assim como verdadeiros parâmetros coadjuvantes.

No entanto, principalmente em função do mais preciso dimensionamento, pela adoção das ferramentas de cálculo mais eficazes e de novas concepções arquitetônicas, passaram a ser exigidos outros parâmetros e, entre eles, o conhecimento particularizado do módulo de deformação. Gandomi *et al.* (2015), Alsaman *et al.* (2017) e Davraz *et al.* (2018) destacam que o módulo de deformação do concreto é essencial para o dimensionamento de qualquer tipologia estrutural.

Foram sendo admitidos vãos e alturas maiores, resultando em índices de esbeltez ainda não experimentados. Estruturas particulares como torres de telefonia ou para suporte de aerogeradores condicionaram a verificação de valores para o módulo de deformação compatíveis com a nova ordem estabelecida em projetos.

Oliveira e Cardoso (2018) citam que o maior entendimento do comportamento das estruturas, e também, a utilização dos materiais com menor peso específico

possibilitaram a utilização de estruturas mais esbeltas, sendo a rigidez dos pórticos estruturais reduzida, resultando em estruturas mais deformáveis.

1.1 JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Como é de praxe para os concretos convencionais empregados nas obras civis, a propriedade que melhor o define é a resistência à compressão. Historicamente a avaliação do módulo de deformação sempre foi um parâmetro relegado a um segundo plano em projetos de estruturas corriqueiras, tais como reticulados de concreto armado com vãos pequenos empregados na maioria das obras de edificações residenciais.

Ali, Farid e Al-Janabi (1990) destacam a importância do conhecimento da relação existente entre a resistência e a deformação do concreto. Neville e Brooks (2013), Arruda (2013), Alsaman *et al.* (2017), Oliveira e Cardoso (2018) descrevem que a resistência à compressão e o módulo de deformação não tem relação direta, ou seja, o aumento da resistência não garante um concreto pouco deformável.

Ribeiro e Almeida (2002) citam que o módulo de deformação de concretos utilizados em barragens variavam significativamente, com valores da ordem de 6,9 GPa (Middle Fork – EUA), e valores mais elevados como de 31,9 GPa (Itaipu – Brasil). Já, Alsaman *et al.* (2017) estudaram a relação entre resistência à compressão e o módulo de concretos de alto desempenho (CAD). Os autores obtiveram resistências à compressão entre 124,1 MPa e 162,4 MPa e valores de módulo entre 36,9 GPa e 45,9 GPa.

O que pode ser afirmado, em função de inúmeros ensaios de determinação do módulo de deformação do concreto, realizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Fundação de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (CIENTEC), é existir uma variada amplitude para mesmos níveis de resistência à compressão. A Tabela 1 apresenta uma síntese do histórico dos resultados do período de 2008 a 2017.

Tabela 1 – Dados históricos da CIENTEC

| Resistência à compressão média (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | Número de observações (ensaios) |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 15,0 a 20,0 | 20,2 a 42,7 | 25 |
| 20,1 a 25,0 | 24,8 a 52,9 | 60 |
| 25,1 a 30,0 | 20,4 a 50,6 | 108 |
| 30,1 a 35,0 | 20,2 a 55,5 | 105 |
| 35,1 a 40,0 | 21,0 a 47,2 | 51 |
| 40,1 a 45,0 | 27,2 a 52,8 | 53 |
| 45,1 a 50,0 | 23,9 a 55,3 | 72 |
| 50,1 a 55,0 | 19,5 a 43,4 | 72 |
| 55,1 a 60,0 | 24,4 a 53,6 | 33 |
| > 60,0 | 23,2 a 54,6 | 38 |

Com base nas informações apresentadas na Tabela 1, é possível inferir, em função da amplitude da variação observada no valor do módulo de deformação, para cada faixa de resistência considerada, haver forte influência de outras variáveis, que não apenas a resistência à compressão do concreto.

Vale destacar que os dados apresentados na Tabela 1 são constituídos essencialmente por ensaios realizados em corpos de prova oriundos das mais diversas tipologias de obras de construção civil e sujeitos às condições de moldagem e cura adotadas no canteiro de obra.

Assim, a estimativa teórica que pode ser feita para o valor do módulo de deformação, através da fórmula apresentada na NBR 6118 (ABNT, 2014), indica não haver precisão, por ser baseada apenas na resistência à compressão.

A exigência de valores mais elevados para o módulo de deformação condiciona muitas vezes a elevação da resistência à compressão, a fim de suprir esta necessidade de projeto. Na prática, os valores esperados não são atingidos, mesmo com a elevação da resistência à compressão. Ao contrário, pode gerar a redução dos valores do módulo de deformação do concreto, em algumas situações.

Guimarães e Santos (1999) e Oliveira e Cardoso (2018) alertam que os problemas ocasionados por deformações excessivas nas estruturas podem estar associados tanto à resistência mecânica da peça, quanto ao módulo de deformação do concreto, esse último nem sempre tendo seu real valor aferido.

Vasconcelos e Giammusso (1998) citam que as desformas prematuras causam flechas excessivas em lajes e a maioria das cargas de protensão são aplicadas a partir do atingimento de uma resistência à compressão satisfatória. Entretanto, embora verificada a resistência requerida para aplicação da protensão, muitas vezes o módulo é insuficiente. Nesse caso é possível ocorrerem contraflechas excessivas (OLIVEIRA e CARDOSO, 2018).

Aguilar *et al.* (2006) destacam que o módulo é importante tanto para a montagem/fabricação/movimentação de um elemento de concreto, quanto para a vida útil da estrutura, pois está diretamente relacionado à estabilidade dimensional, deformações instantâneas e progressivas que o concreto pode sofrer.

Montija (2007) verificou, em uma viga genérica, que a redução de 4 GPa no módulo de deformação do concreto causa redução no coeficiente de rigidez da estrutura, ocasionando um aumento próximo à 9% na flecha final do elemento. Para Tibbetts *et al.* (2018) a redução de 5% no valor do módulo ocasiona elevação de 5% nas deformações do elemento fletido.

Oliveira e Cardoso (2018) alertam que vigas e lajes sofrem deformação naturalmente sob a ação das cargas de serviço e acidentais, bem como simplesmente pela ação do peso próprio. Silva e Filho (2006) enumeram uma série de consequências causadas pelas deformações excessivas, dentre elas:

- a) comprometimento de funcionamento adequado de janelas e portas;
- b) alvenarias não estruturais podem receber carregamento e apresentar fissuras ou esmagamentos;
- c) necessidade de executar regularização de lajes em havendo deformações excessivas;
- d) instalação de processos de fissuração, comprometendo a estética e a durabilidade da edificação.

Oliveira e Cardoso (2018) enfatizam a falta de uma visão global sobre a edificação, o que prejudica sobremaneira o subsistema de vedação, o qual acaba por receber cargas que não são pertinentes à sua função.

Outro fator a ser considerado é a grande tendência das construções seguirem no sentido contrário ao da rigidez, tornando-se cada vez mais esbeltas, aumentando a preocupação e a atenção com as deformações e com a adequação dos processos envolvidos na construção (DJANIKIAN FILHO, 2010; TIBBETTS *et al.*, 2018).

Por fim, os problemas causados pelas deformações excessivas interferem diretamente na durabilidade da edificação, bem como geram alto custo de reparação e a correção das patologias necessitam de mão de obra especializada (OLIVEIRA e CARDOSO, 2018).

Essas observações configuram a fundamental importância de que todas as variáveis intervenientes no processo sejam conhecidas para, através de seu controle, permitirem a realização de dosagens de concreto, sendo o módulo de deformação um parâmetro de entrada.

O comportamento do concreto quanto à sua deformabilidade propõe um questionamento fundamental para o entendimento do fato constatado, qual seja a definição efetiva das variáveis envolvidas. Também, vale ressaltar que nenhum trabalho consultado na revisão bibliográfica procedeu ao isolamento dos parâmetros de dosagem. Assim, muitas vezes nos estudos já realizados ocorre a sobreposição dos efeitos sobre os valores do módulo de deformação, diferentemente deste trabalho.

Ainda, merece ser destacado que a bibliografia consultada não apresenta estudos em relação a cura à vapor, a qual é adotada por diversas indústrias de pré-fabricados e pré-moldados, sendo esta abordada pelo presente estudo.

Portanto, a única maneira de responder a esse questionamento é o estudo comparativo de concretos concebidos de maneira a permitir tanto quanto possível o isolamento de cada um dos parâmetros de dosagem para avaliar a influência sobre o módulo de deformação.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.2.1 Objetivo geral

A presente pesquisa visa avaliar de forma discretizada a influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto de cimento Portland.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são enumerados a seguir.

- a) analisar o efeito provocado pela alteração do volume de pasta sobre o módulo de deformação do concreto, quando fixada a resistência à compressão, o teor de argamassa e o tipo de agregado graúdo;
- b) investigar a relação existente entre a resistência à compressão e o módulo de deformação do concreto, ao manter constantes os volumes de pasta e de agregado, o teor de argamassa e o tipo de agregado graúdo que o compõem;
- c) observar a influência de diferentes teores de argamassa no módulo de deformação do concreto, quando fixados os volumes de pasta e de agregado, a resistência à compressão e o tipo de agregado graúdo;
- d) analisar o efeito causado por diferentes tipos de agregados graúdos sobre o módulo de deformação do concreto, ao fixar o volume absoluto de agregado graúdo e da pasta, bem como a resistência à compressão e o teor de argamassa;
- e) investigar a influência da cura úmida e da cura a vapor no módulo de deformação do concreto, ao manter constantes os volumes de pasta e de agregado, a resistência à compressão (relação água/cimento), o teor de argamassa e o tipo de agregado graúdo que o compõem;
- f) explorar o comportamento do módulo de deformação do concreto em diferentes idades de ensaio, para as variáveis de dosagem: volume de pasta, resistência à compressão, teor de argamassa, tipo de agregado graúdo e tipo de cura.

1.3 DELIMITAÇÕES

O desenvolvimento do presente trabalho foi realizado integralmente em ambiente de laboratório. O programa experimental utilizou um (01) tipo de cimento Portland (CP V ARI), cinza volante de uma (01) procedência, uma (01) areia natural quartzosa e três (03) agregados graúdos com diferentes características, comercialmente e conhecidos na região de Porto Alegre/RS como granito, basalto e diabásio.

A reprodução dos traços foi realizada em misturador de eixo vertical e, quando necessário foi utilizado um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos para ser atingido um nível de plasticidade, tal que não compromettesse a eficácia do processo de moldagem dos corpos de prova.

Foram empregados traços em massa que refletem as condições de produção de concreto corriqueiramente sem, no entanto, abranger a totalidade de combinações possíveis, entre aglomerante e agregados.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

No capítulo 1 é realizado um levantamento histórico dos dados obtidos e arquivados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) referentes ao módulo de deformação do concreto de forma a justificar a importância da pesquisa. É feita, ainda, a apresentação do objetivo geral e dos objetivos específicos, bem como as delimitações da pesquisa.

O capítulo 2 reforça a relevância do tema abordado. Esse capítulo apresenta a relação entre a tensão aplicada e a deformação originada. Ainda, no capítulo 2, são elencadas as principais fontes de influência no valor do módulo de deformação, destacando e analisando uma abordagem sobre a metodologia de ensaio e a dosagem dos materiais que constituem o concreto. No capítulo 2 é feita a identificação das variáveis de dosagem que interferem diretamente no valor do módulo de deformação, servindo como subsídio para a consecução do objetivo geral da pesquisa.

A predição teórica do módulo de deformação é apresentada no capítulo 3. Nele estão destacadas a evolução da equação empírica presente na NBR 6118 (ABNT, 2014) e também as atuais equações prescritas em alguns procedimentos internacionais. Ainda, o capítulo 3 apresenta, com base na pesquisa bibliográfica, algumas equações para a estimativa do módulo de deformação, obtidas de estudos regionalizados no Brasil, com diferentes tipos de agregados e resistências à compressão.

O capítulo 4 relata o programa experimental do trabalho, relacionando os materiais empregados e sua caracterização física, mecânica e química. São apresentados os métodos de moldagem, preparação e ensaios aplicados aos corpos de prova. Inicialmente é realizada uma avaliação preliminar (primeira fase) dos seguintes parâmetros de dosagem: o volume de pasta, a resistência à compressão, o teor de argamassa e o tipo do agregado graúdo. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de verificar a alteração do módulo de deformação do concreto, frente ao isolamento de cada parâmetro.

A definição do Programa Experimental para a reprodução dos traços de concreto a serem empregados partiu da identificação dos parâmetros de dosagem como apresentados no capítulo 2, sendo:

- a) o volume de pasta;
- b) a resistência à compressão;
- c) o teor de argamassa;
- d) o tipo do agregado graúdo;
- e) o tipo de cura e;
- f) a idade do concreto.

Os resultados e as discussões obtidas da reprodução da segunda fase do Programa Experimental estão apresentados no capítulo 5.

As considerações finais, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros estão constam no capítulo 6.

No capítulo 7 estão descritas as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

Já nos apêndices enumerados de “A” a “I” estão registrados os resultados obtidos para o módulo de deformação do concreto de todos os traços reproduzidos.

2 DEFORMAÇÕES DO CONCRETO

O dimensionamento das estruturas de concreto armado se baseia em propriedades mecânicas dos materiais constituintes, e no caso do concreto, a resistência à compressão é sua principal propriedade. Para a avaliação das deformações das estruturas é necessário o conhecimento do módulo de deformação, o qual caracteriza sua maior ou menor rigidez, ou seja, respectivamente, a menor ou maior capacidade de deformação (VILARDELL *et al.*, 1998; SIDERIS, MANITA e SIDERIS, 2004; DE MARCHI *et al.*, 2010; GANDOMI *et al.*, 2015; KOCÁB *et al.*, 2017a; DAVRAZ *et al.*, 2018).

De acordo com Melo Neto e Helene (2002), Montija (2007), Alsaman *et al.* (2017) e Tibbetts *et al.* (2018), a determinação da resistência à compressão e do módulo de deformação do concreto permite verificar de forma mais realista o comportamento da estrutura, frente à deformabilidade. Segundo Davraz *et al.* (2018), sendo esse fato mais relevante em se tratando de estruturas que por suas características geométricas e de carregamento são mais sensíveis à deformação.

A NBR 8522 (ABNT, 2017) apresenta o procedimento para a determinação do módulo de elasticidade e de deformação. Barbosa (2009) explica que o módulo de elasticidade auxilia na avaliação do comportamento global da estrutura e na determinação das perdas de protensão, já o módulo de deformação secante é usado para simular o primeiro carregamento e a verificação das deformações máximas da estrutura.

Tomosawa e Noguchi (1993), Araújo, Guimarães e Geyer (2012), Gandomi *et al.* (2015), Alsaman *et al.* (2017), Kocáb *et al.* (2017a) e Tibbetts *et al.* (2018) salientam que o módulo de deformação está diretamente relacionado ao cálculo de deformações e flechas, ainda na etapa de projeto das estruturas de concreto armado. Caso não sejam atingidas as especificações do módulo requeridas no projeto, poderão ocorrer deformações excessivas, não previstas.

Guimarães e Santos (1999) corroboram que na execução de elementos fletidos de grandes dimensões não são raros os problemas de deformações excessivas. Kliszczewicz e Ajdukiewicz (2002) citam que para a análise das perdas de

protensão é necessária a utilização das características de elasticidade do concreto – o módulo.

Já, no dimensionamento das estruturas com aplicação de concretos de alto desempenho (CAD) Zhou, Lydon e Barr (1995), Vogel e Svecova (2012) e Alsaman *et al.* (2017) destacam que é importantíssimo verificar se as deformações máximas são satisfatórias para a condição de serviço das estruturas.

2.1 RELAÇÃO TENSÃO *VERSUS* DEFORMAÇÃO

O comportamento do concreto frente à deformação varia de acordo com o nível da tensão aplicada. Assim, a NBR 8522 (ABNT, 2017) distingue a determinação do módulo de elasticidade e do módulo de deformação.

Castro *et al.* (1999) e Vogt (2006) descrevem que o valor da deformação é proporcional à tensão quando um material apresenta comportamento no regime elástico, sendo o módulo de elasticidade a inclinação da reta entre tensão e deformação. Nesse sentido a NBR 8522 (ABNT, 2017) restringe a determinação do módulo de elasticidade a 30% da resistência à compressão média, inferindo assim que até esse nível de carregamento o comportamento seja linear, servindo para avaliar a elasticidade global do projeto.

Por outro lado, a NBR 8522 (ABNT, 2017) trata do traçado do diagrama tensão *versus* deformação num carregamento progressivo entre 20 e 80% da resistência à compressão média, estabelecendo assim que o módulo de deformação corresponde à tensão de 30%.

De acordo com Martins (2008) e Tibbetts *et al.* (2018), o módulo de deformação é utilizado para verificar o estado limite de serviço (ELS) da estrutura no primeiro carregamento.

Conforme o item 3.4 da NBR 8522 (ABNT, 2017), até o nível de carregamento de 30%, calculado sobre a resistência do concreto, desde que garantida a proporcionalidade entre tensão e deformação, o módulo de elasticidade apresentará valor coincidente com o módulo de deformação secante.

O grau de deformação de qualquer material está condicionado ao estágio de carregamento, ou ao nível de tensão aplicado sobre ele, e ao comportamento de sua microestrutura. Nos materiais perfeitamente elásticos a deformação é proporcional à tensão, sendo esta relação conhecida como Lei de Hooke.

De acordo com Aguilar *et al.* (2006), Vogt (2006) e Callister (2006), para entender o comportamento das deformações sob o efeito de uma força, torna-se necessário avaliar as ligações entre os átomos (Figura 1).

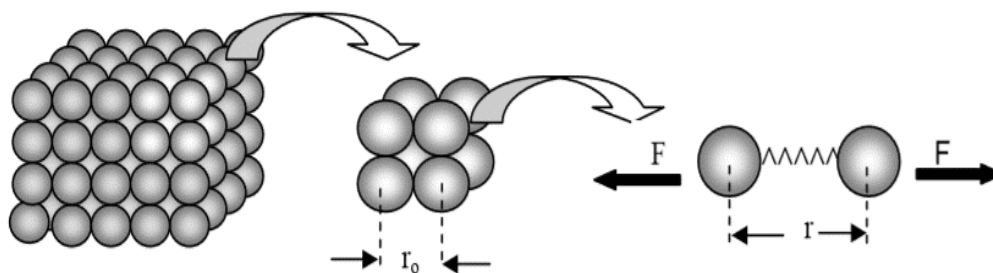


Figura 1 - Deformação entre os átomos (Aguilar *et al.*, 2006)

Aguilar *et al.* (2006) citam que num composto homogêneo, as ligações entre os átomos funcionam como uma mola, ao serem tracionadas ou comprimidas. Dessa maneira, torna-se possível calcular o módulo de elasticidade ou de deformação através da energia de ligação e da distância interatômica entre dois átomos. Barbosa (2009) complementa, ao citar que na fase elástica, as deformações desaparecem quando a carga é retirada, entretanto, nas deformações plásticas há um deslocamento permanente dos átomos, levando à ruptura total ou parcial das ligações interatômicas.

Aguilar *et al.* (2006) e De Marchi (2011) alertam que no concreto, devido às interfaces entre os componentes (zona de transição), a determinação do módulo é mais complicada, fato agravado pelas baixas deformações percebidas e por apresentar ligações típicas dos materiais cerâmicos. Vogt (2006) complementa que se o material tiver um módulo alto, a deformação é pequena, o que dificulta a precisão das leituras das deformações.

O concreto é um material heterogêneo, cujos constituintes tem comportamentos distintos, seja quanto à rigidez e/ou à resistência mecânica. A Figura 2 ilustra as relações entre a resistência e as deformações para os diferentes constituintes do concreto.

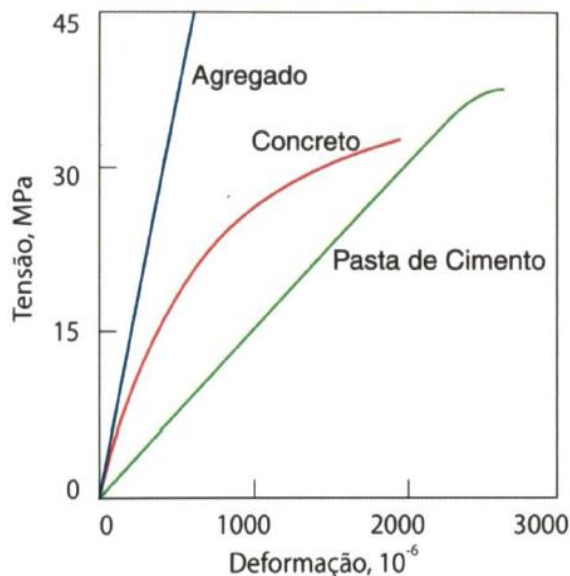


Figura 2 - Deformação dos constituintes do concreto (Mehta e Monteiro, 2014)

É possível verificar que para um mesmo nível de resistência, o agregado graúdo acusa deformações inferiores às desenvolvidas na pasta de cimento hidratada, apresentando maior índice de rigidez. Assim, a lógica apresentada na Figura 2 demonstra que, na medida em que a quantidade de agregado graúdo cresce na mistura, o módulo de deformação aumenta.

Vasconcelos e Giammusso (1998), Li *et al.* (1999), Aguilar *et al.* (2006), Barbosa (2009) e Gidrão (2015) citam que num material composto, o valor do módulo é afetado pela natureza, volume e características dos constituintes. Montija (2007) esclarece que as deformações irão se distribuir de forma diferente entre os elementos cristalinos e não cristalinos, pois eles apresentam composições, rigidez, tamanho e estrutura porosa distintos.

Por outro lado, a segregação que porventura venha ocorrer ao concreto, não permitirá mostrar o real efeito dos materiais, refletindo assim um problema de dosagem ou de execução.

Neville e Brooks (2013) salientam que a máxima tensão suportada pelo concreto normalmente depende da zona de transição, a qual é definida pela interface entre a pasta e o agregado. Mehta e Monteiro (2014) corroboram que essa interface tem maior porosidade e menor resistência, explicando, assim, o comportamento heterogêneo, não linear, de tensão *versus* deformação do concreto.

Ribeiro e Almeida (2002) e Martins (2008) enfatizam que, mesmo antes da aplicação de carga, o concreto já apresenta microfissuras na zona de transição, fato oriundo da retração.

A Figura 3 apresenta o sistema de propagação de fissuras que ocorre no interior do concreto, quando é submetido ao carregamento até a ruptura.

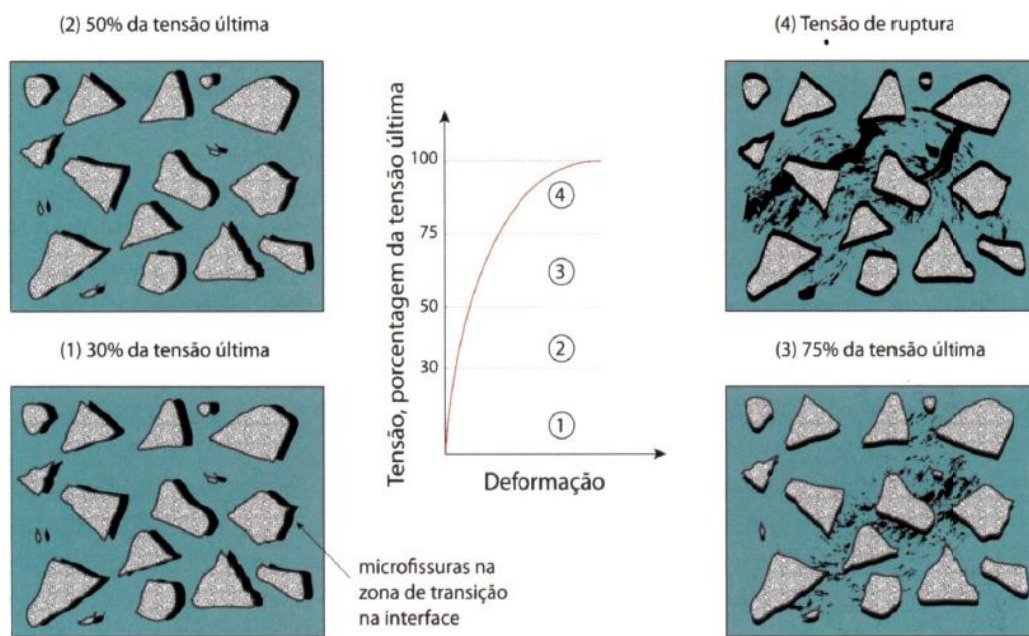


Figura 3 - Efeito do carregamento na deformação do concreto (Mehta e Monteiro, 2014)

Mehta e Monteiro (2014) descrevem, com base na Figura 3, que as deformações podem ser divididas em quatro diferentes estágios. Inicialmente há o surgimento de microfissuras na zona de transição, devido aos distintos módulos de deformação dos constituintes do concreto, estabelecendo, assim deformações diferenciais entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo, isto ocorre normalmente até 30% da carga de ruptura, havendo uma zona de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, definindo um comportamento elástico.

Posteriormente, o incremento de tensão faz com que as fissuras na zona de transição aumentem em abertura e comprimento. Na evolução deste carregamento, até o limite de 50%, deixa de existir a proporcionalidade entre a tensão e a deformação, ou seja, a curva apresenta um ponto de inflexão, abandonando o modelo linear (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

No terceiro estágio há a propagação das fissuras na zona de transição, acentuando a inclinação da curva tensão-deformação, tendendo à assintossidade com a abcissa e, ao atingir 75% da tensão final, o sistema de fissuração se instabiliza.

Após o carregamento de 75%, as taxas incrementais de tensões elevam rapidamente os níveis de deformação e, assim, por estarem instáveis, levam ao colapso da matriz, propagando grande quantidade de fissuras até a ruptura do concreto com a tensão máxima (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Ali, Farid e Al-Janabi (1990) e Gidrão (2015) citam que a quantidade e a velocidade de propagação das fissuras dependem exclusivamente do tipo e da proporção dos materiais utilizados na produção do concreto, mesmo que a resistência à compressão seja similar. Ainda, com base na Figura 2, ao comparar o agregado e a pasta, essa última sofre maiores deformações, ou seja, o aumento do volume de pasta incrementa as deformações do concreto.

Benetti (2012) cita que pelo fato de o concreto não ser um material homogêneo e não obedecer ao comportamento da Lei de Hooke, a determinação do módulo é mais complexa.

Vasconcelos e Giammusso (1998), Guimarães e Santos (1999), Li *et al.* (1999), Wang e Li (2007), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014), Gidrão (2015), Del Bosque *et al.* (2017), Zijian *et al.* (2017) e Tibbetts *et al.* (2018) elencam alguns fatores, tais como: a porosidade do agregado graúdo, quantidade e qualidade da matriz de pasta, as características da zona de transição, a condição de carregamento e o teor de umidade, que podem influenciar a resistência à compressão e o módulo de deformação do concreto. A Figura 4 apresenta os principais fatores que influenciam nas deformações do concreto.

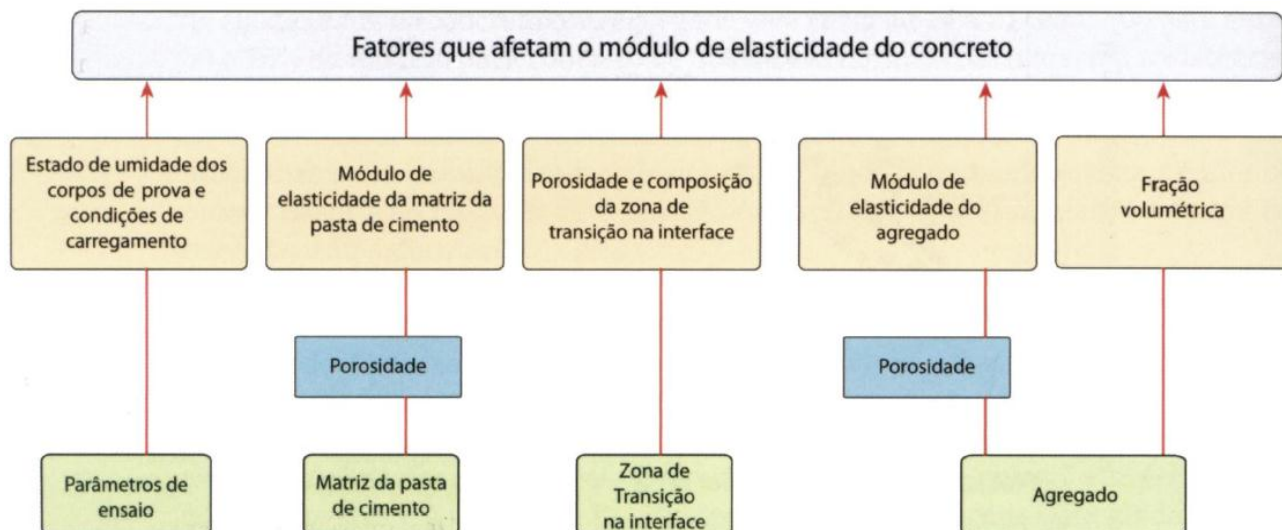


Figura 4 - Fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto (Mehta e Monteiro, 2014)

Através da Figura 4 é possível verificar que os fatores que afetam o módulo de elasticidade/deformação estão distinguidos em duas áreas. A primeira relacionada aos parâmetros de ensaio, os quais são de mais fácil controle por meio de normalização. A outra baseia-se nas propriedades dos materiais empregados na composição do concreto.

Nos itens 2.2 e 2.3 serão descritas com mais profundidade essas duas áreas: a referente ao ensaio e aos parâmetros de dosagem dos materiais que constituem o concreto.

2.2 VARIABILIDADE DO ENSAIO DE MÓDULO

O procedimento para a obtenção dos valores relacionados com a deformação do concreto parte do conhecimento prévio dos métodos, de forma especial das NBR 5738 (ABNT, 2015), NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABNT, 2017). A primeira norma trata exclusivamente da técnica de moldagem, cura e preparo das amostras, enquanto que a segunda apresenta a metodologia do ensaio de resistência à compressão, bem como os requisitos dos equipamentos utilizados. A última é a referência normativa para a determinação dos diferentes tipos de módulo.

As variações que podem ocorrer nos resultados são ilimitadas. Bilesky (2016) informa que, ao considerar todas as variáveis e dificuldades no ensaio de módulo, se o procedimento for realizado de acordo com a NBR 8522, não deveriam

ocorrer erros sistemáticos, os quais influenciam no valor da incerteza ou dos desvios do ensaio.

Por outro lado, ao mesmo tempo em que as referidas normas registram a sistemática de ensaio, deixam algumas possibilidades de escolha aos responsáveis por sua condução, tais como:

- a) a dimensão do corpo de prova cilíndrico: (10 x 20) cm ou (15 x 30) cm;
- b) o adensamento de corpos de prova: por vibração mecânica ou adensamento manual;
- c) a preparação das bases: retificação, capeamento com enxofre, pasta de cimento ou gesso, argamassa, ou outro;
- d) o equipamento de compressão que deve atender aos requisitos de exatidão, precisão, reprodutibilidade e reversibilidade de acordo com a classe 0,5 ou 1, classificação essa de acordo com a NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016);
- e) o equipamento para medição dos deslocamentos: relógio comparador, *strain gages*, LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), medidores de deformação elétricos, ou outros.

Mesmo que todas as variáveis da metodologia de ensaio sejam controladas, ainda há o fator humano, o operador do equipamento do ensaio.

Bilesky (2016) descreve como exemplo da falta de treinamento, o mau posicionamento do corpo de prova entre os pratos da prensa. No mesmo sentido poderiam ser citadas diversas outras fontes de erros, não intencionais, mas que podem conduzir a um resultado distorcido. A Figura 5 apresenta um procedimento que não consta da NBR 8522 (ABNT, 2017) e que pode conduzir a erros de interpretação do resultado, no qual o medidor de deformação é apoiado junto ao filme plástico aplicado à superfície do corpo de prova.



Figura 5 – Fonte de erro de leitura de deformação (Katayama, 2016)

Diante do apresentado na Figura 5, afirma-se que, se este dispositivo fosse utilizado na determinação da resistência à compressão, não haveria influência no resultado. Entretanto, a leitura das deformações pode ser afetada, através do deslizamento dos medidores junto ao filme plástico.

Há que se considerar, ainda, erros aleatórios causados por aspectos inerentes ao processo de moldagem dos corpos de prova, intrínsecos ao ensaio, como o efeito parede que, dependendo do processo de adensamento empregado, pode determinar maior concentração de argamassa e pasta na superfície em contato com a fôrma.

Com base na Figura 6, é possível verificar que junto à face da fôrma/molde se forma uma região com maior concentração de pasta e maior porosidade. Como os medidores de deformação, na maioria das vezes, são posicionados junto à face lateral do corpo de prova, é possível que sejam medidas deformações mais elevadas por serem avaliadas diretamente na pasta. Cuidados especiais devem ser tomados com o posicionamento dos medidores de deformação que devem ter

os pontos de contato em locais onde a superfície não apresente irregularidades, tais como porosidades, fissuras e desníveis.

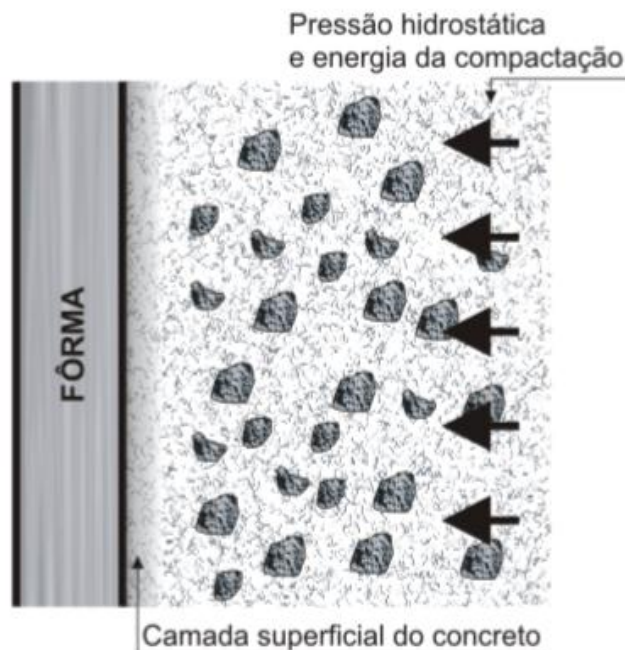


Figura 6 – Efeito parede do concreto (Geyer e Greven, 1999)

Entre os anos de 1999 e 2017, o Laboratório de Materiais de Construção Civil da Fundação de Ciência e Tecnologia participou de Programas Interlaboratoriais de Concreto, organizado pela Comissão Técnica 01 – Construção Civil, com o apoio do INMETRO e do Laboratório da Eletrobrás – Furnas Centrais Elétricas S.A. A seguir, nas Tabelas 2 e 3 e nas Figuras 7 e 8 está apresentado o resumo das informações dos resultados de módulo obtidos dos relatórios enviados ao final de cada programa, não sendo desprezado nenhum resultado.

Tabela 2 - Histórico de desvios-padrão dos Programas Interlaboratoriais de Concreto

| Resultados dos Programas Interlaboratoriais de Concreto: Desvios-padrão (GPa) | | | | | |
|--|---------|------|------|---------|-------------|
| Ano | Amostra | | Ano | Amostra | |
| | A | B | | A | B |
| 1999 | 3,52 | 4,60 | 2008 | 3,68 | 2,85 |
| 2000 | 4,93 | 4,26 | 2010 | 4,94 | 4,80 |
| 2001 | 3,56 | 4,97 | 2011 | 8,29 | 8,63 |
| 2002 | 5,19 | 5,24 | 2012 | 3,96 | 11,2 |
| 2003 | 3,48 | 2,85 | 2013 | 4,73 | 6,90 |
| 2004 | 3,84 | 3,51 | 2014 | 5,38 | 6,81 |
| 2005 | 4,58 | 3,65 | 2015 | 2,43 | 2,82 |
| 2006 | 2,15 | 1,48 | 2016 | 2,02 | 3,08 |
| 2007 | 4,41 | 4,38 | 2017 | 2,36 | 1,78 |
| Mínimo Geral (GPa) | | | | | 1,48 |
| Máximo Geral (GPa) | | | | | 11,2 |
| Média Geral (GPa) | | | | | 4,37 |
| Amplitude (GPa) | | | | | 9,72 |

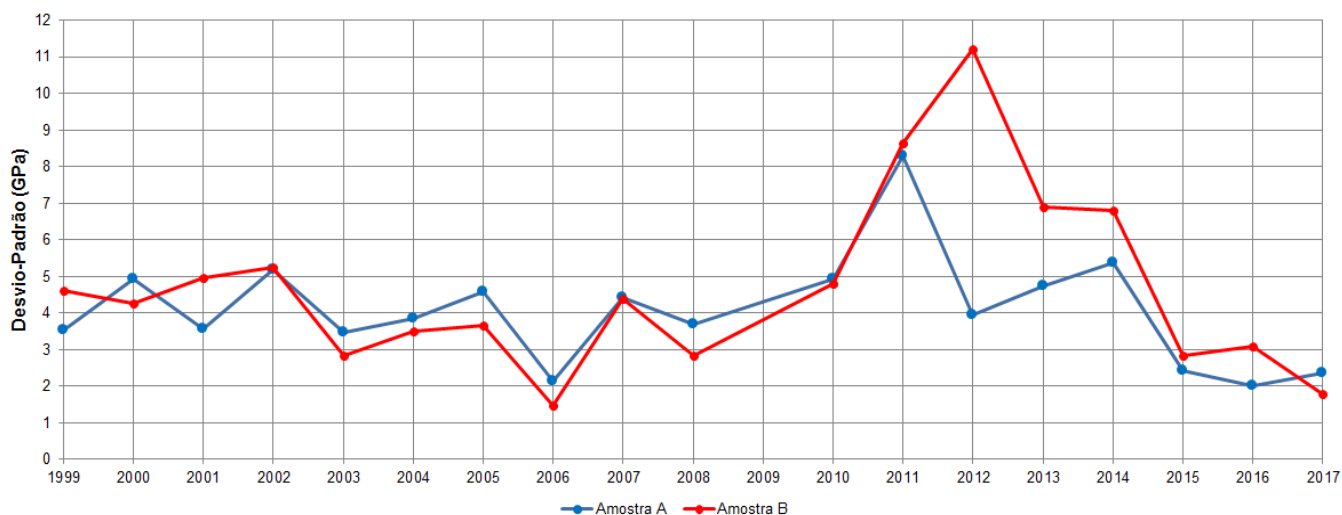


Figura 7 – Série dos desvios-padrão dos Programas Interlaboratoriais de Concreto

Tabela 3 - Histórico dos Coeficientes de Variação dos Programas Interlaboratoriais de Concreto

| Resultados dos Programas Interlaboratoriais de Concreto: Coeficiente de Variação (%) | | | | | |
|---|---------|------|------|---------|-------------|
| Ano | Amostra | | Ano | Amostra | |
| | A | B | | A | B |
| 1999 | 15,9 | 19,3 | 2008 | 12,0 | 10,1 |
| 2000 | 25,2 | 21,9 | 2010 | 10,1 | 12,5 |
| 2001 | 19,6 | 27,0 | 2011 | 19,1 | 23,4 |
| 2002 | 22,5 | 22,5 | 2012 | 14,0 | 29,0 |
| 2003 | 12,4 | 10,5 | 2013 | 10,3 | 15,3 |
| 2004 | 14,0 | 12,9 | 2014 | 16,3 | 19,4 |
| 2005 | 19,8 | 16,4 | 2015 | 9,8 | 13,7 |
| 2006 | 9,0 | 6,4 | 2016 | 6,5 | 12,0 |
| 2007 | 17,2 | 17,1 | 2017 | 10,0 | 8,4 |
| Mínimo Geral (%) | | | | | 6,4 |
| Máximo Geral (%) | | | | | 29,0 |
| Média Geral (%) | | | | | 15,6 |
| Amplitude (%) | | | | | 22,6 |

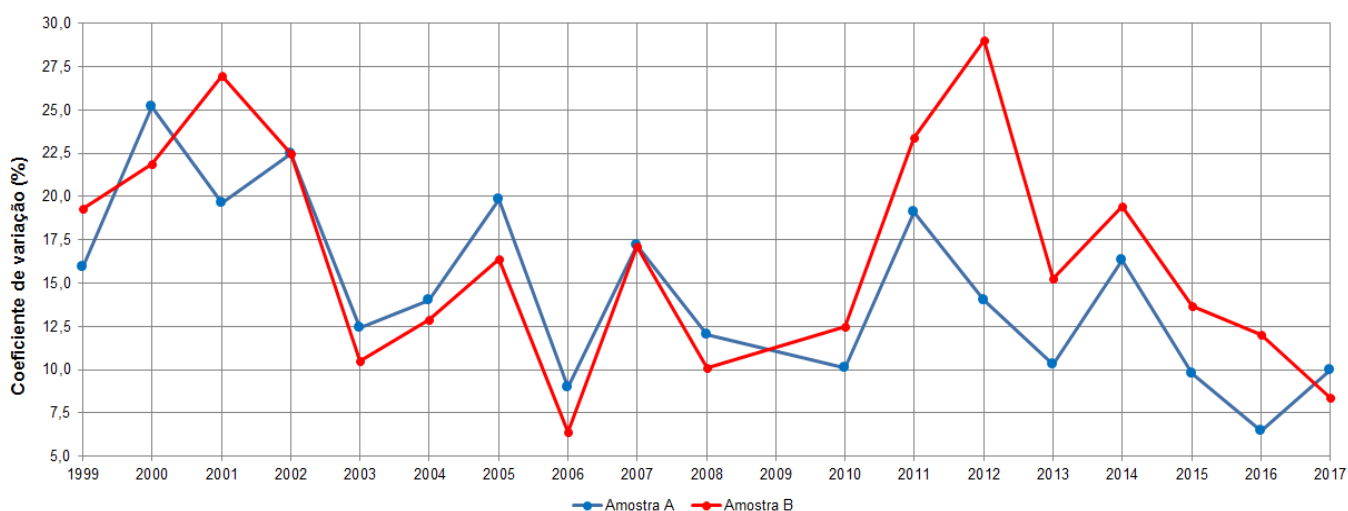


Figura 8 – Série dos Coeficientes de Variação dos Programas Interlaboratoriais de Concreto

Nesse tipo de programa de comparação de resultados, as amostras, sempre duas diferentes (A e B), são produzidas por um mesmo laboratório, podendo ser consideradas homogêneas, de maneira que as variações observadas estão relacionadas com o procedimento de ensaio ou com os equipamentos utilizados.

O resultado obtido por um laboratório pode ser considerado satisfatório se este estiver próximo do valor médio geral, através da análise por duas ferramentas: elipse de confiança (método de Youden) e por estatística robusta (método Z-Score).

É possível perceber a grande dispersão dos resultados, tendo como desvio-padrão médio histórico de 4,37 GPa. Entretanto o maior valor de desvio ocorreu em 2012 com 11,2 GPa, enquanto que o menor 1,48 GPa em 2006.

Ainda, a média do coeficiente de variação ficou em 15,6%, oscilando entre 6,4% (2006) a 29%, em 2012. Vasconcelos e Giammusso (1998) afirmam que ao resultado obtido do módulo podem estar associadas dispersões da ordem de 25%, permitindo não ter a segurança necessária para a avaliação do resultado, ou seja, a certeza satisfatória do resultado.

Com base no descrito por Vasconcelos e Giammusso (1998), Shehata (2005), De Marchi (2011), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014) é possível desmembrar a influência das seguintes variáveis no ensaio de módulo:

- a) corpo de prova: tamanho, umidade no momento do ensaio e tipo de preparação das bases;
- b) máquina de ensaio: classe e capacidade do equipamento, e taxa de carregamento aplicada;
- c) medidores de deformação: posicionamento, base de medida e tipo de medidor utilizado.

O objetivo geral do presente trabalho não é o estudo da influência das variáveis do ensaio, porém, visando minimizar as variações e delinear os critérios a serem adotados no programa experimental, torna-se fundamental a revisão bibliográfica desse assunto. Dessa forma, nos itens a seguir serão apresentadas as opiniões de diversos autores em torno dos parâmetros de ensaio.

2.2.1 Variações no ensaio devidas à amostra

Os corpos de prova são moldados e tratados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015). Nunes (2005) ressalta que, em tese, ao serem mantidos uniformes a moldagem dos corpos de prova, o procedimento de cura e o método de ensaio, os resultados

de resistência à compressão e módulo dependerão única e exclusivamente das características do concreto, desde que garantida a calibração do equipamento de compressão.

Entretanto, a NBR 5738 (ABNT, 2015), NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABNT, 2017) deixam algumas lacunas passíveis de questionamento e que devem ser objeto de estudo. Por exemplo: os corpos de prova para a determinação do módulo de deformação devem permanecer em ambiente climatizado até a data de ensaio, porém o concreto empregado *in loco* não apresentará as mesmas condições.

Desta forma, nos itens a seguir será realizada uma breve discussão acerca das lacunas existentes que são passíveis de questionamento em torno do resultado obtido para o módulo de deformação.

2.2.1.1 Dimensões dos corpos de prova

A escolha do tamanho dos corpos de prova fica a critério do responsável pela execução da obra ou pelo laboratório contratado para efetuar o controle tecnológico do concreto. No passado, o tamanho padrão dos cilindros era (150 x 300) mm. Atualmente a NBR 5738 (ABNT, 2015) permite a utilização de corpos de prova de (100 x 200) mm.

As razões prováveis para essa mudança são o menor peso e quantidade de concreto necessária para a moldagem, redução da dimensão máxima característica dos agregados e da capacidade dos equipamentos de compressão. Também pelo aumento significativo da resistência à compressão nas últimas décadas (GUJEL, KAZMIERCZAK e MASUERO, 2017).

Martins (2008) alerta para que sejam utilizados corpos de prova de acordo com as relações altura/diâmetro especificadas em norma. Já Araújo, Guimarães e Geyer (2012) verificaram que corpos de prova com dimensão nominal de (150 x 300) mm apresentam resultados com menor variabilidade, tanto na leitura das deformações específicas, quanto no valor do módulo, em comparação aos resultados obtidos em corpos de prova cilíndricos com dimensão de (100 x 200) mm.

Del Viso, Carmona e Ruiz (2008) verificaram em seu estudo com corpos de provas cilíndricos de (75 x 150) mm e (100 x 200) mm, que os valores das deformações específicas são menores para o diâmetro de 75 mm, permitindo a obtenção de valores mais elevados para o módulo. A Figura 9 apresenta a influência da dimensão dos corpos de prova e da resistência à compressão na leitura das deformações.

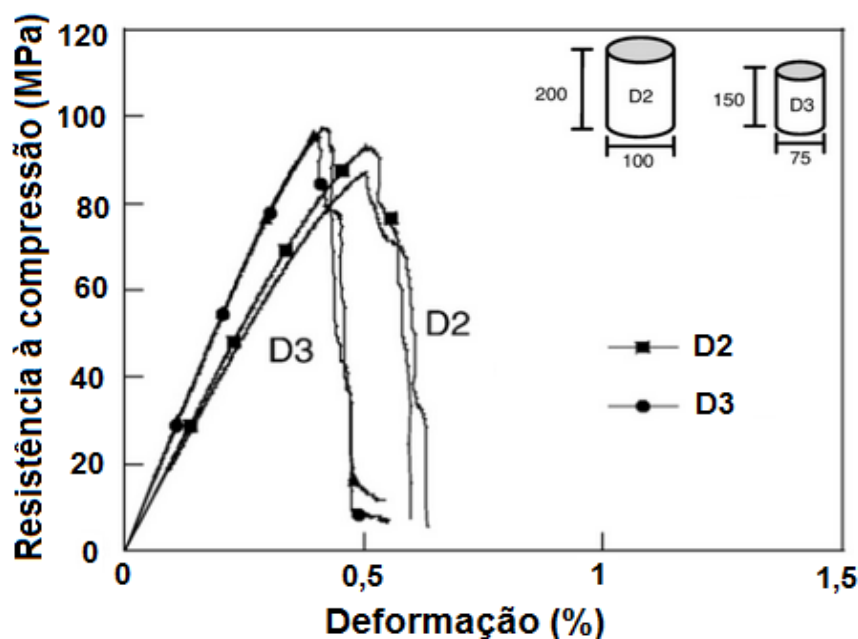


Figura 9 - Influência do diâmetro e da resistência na deformação específica (Del Viso, Carmona e Ruiz, 2008)

Já, Cupertino *et al.* (2008), ao realizarem estudo amplo dos resultados do Programa Interlaboratorial de 2007 sobre diversos parâmetros de ensaio na obtenção do módulo de elasticidade, verificam que corpos de prova com dimensão (100 x 200) mm apresentam resultados superiores e significativos de módulo em relação aos corpos de prova com dimensão (150 x 300) mm.

Martins (2008) estudou concretos com três classes de resistência à compressão (C25, C30 e C40) e duas dimensões básicas de corpos de prova cilíndricos de (100 x 200) mm e (150 x 300) mm e buscou possíveis correlações entre as variáveis para o concreto produzido na região de Goiânia/GO. A Figura 10 mostra o efeito do tamanho do corpo de prova sobre os valores do módulo de deformação, considerando as três (03) classes de resistência.

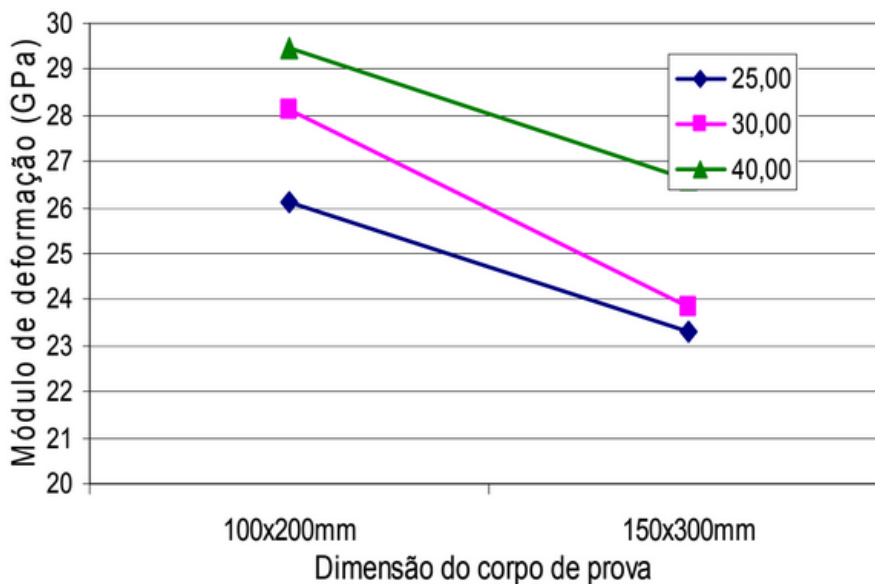


Figura 10 – Influência da dimensão do corpo de prova e da classe de resistência sobre o módulo de deformação (Martins, 2008)

Nota-se, pela Figura 10, que a dimensão do corpo de prova adotado segue o mesmo comportamento para todos os níveis de resistência à compressão estudados, comprovando que a dimensão (100 x 200) mm conduz a resultados de módulo de deformação maiores. Martins (2008) concluiu que a dimensão do corpo de prova tem influência significativa no resultado do módulo de deformação, podendo ocorrer diferenças superiores a 10%.

Malaikah (2004) corrobora que os resultados obtidos em corpos de prova (100 x 200) mm são da ordem de 6% superiores aos verificados em corpos de prova de (150 x 300) mm, enquanto Cupertino *et al.* (2008) encontraram diferença em torno de 8%.

Montoya, Meseguer e Cabre (2000); Jacintho e Giongo (2005) também verificaram menores valores de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de (150 x 300) mm, quando comparados aos cilindros de (100 x 200) mm. Os autores justificam seus resultados ao fato de que os corpos de prova cilíndricos de (150 x 300) mm têm maior volume de concreto e assim podem ocorrer naturalmente a elevação do volume de vazios nas amostras, dependendo do grau de adensamento.

2.2.1.2 Umidade e Temperatura

O teor de umidade do concreto varia de acordo com o local onde é armazenado o corpo de prova até o momento do ensaio. A NBR 5738 (ABNT, 2015) orienta que as amostras devam permanecer, até a idade de ensaio, em ambiente com temperatura e umidade controladas. Umidade relativa igual ou superior a 95% e temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$. Opcionalmente é possível realizar a cura imersa, deixando de lado, assim, a preocupação com a umidade relativa, bastando garantir apenas o intervalo de temperatura especificado.

Kocáb *et al.* (2017a) e Kocáb *et al.* (2017b) afirmam que o método de cura dos corpos de prova afeta não só o desenvolvimento, mas principalmente o valor final do módulo do concreto.

Guimarães e Santos (1999), Li (2004), Aguilar *et al.* (2006) e Mehta e Monteiro (2014) afirmam que, independente da dosagem e do tempo de cura, os corpos de prova de concreto ensaiados saturados apresentam, em geral, valores de módulo de deformação 15% superior aos ensaiados em condições secas. Liu *et al.* (2014) encontraram diferenças de até 30%, comparando ao concreto seco.

L'Hermite (1970) verificou, em estudo expedito, a influência da umidade no módulo de deformação. O autor constatou que ao elevar o teor de umidade de 35% a 75%, o módulo de deformação cresce em torno de 20%. Kallel *et al.* (2017) verificaram que para diferentes temperaturas (30°C e 90°C) e umidade relativa entre 36% e 68%, há redução significativa no valor do módulo do concreto, em comparação aos valores obtidos em umidades de 95% e 100%.

Kocáb *et al.* (2017a) fixaram a temperatura em $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, armazenando as amostras em água e em laboratório, sob umidade relativa controlada de $50\pm 10\%$. Os autores encontram diferenças entre 19,8% e 36,5%, sendo que as amostras imersas em água conduzem aos maiores valores.

Já Rodrigues e Figueiredo (2004) constataram diferenças nos valores do módulo calculado a partir de ensaios realizados com corpos de prova curados via úmida e via seca, verificando que no crescimento entre 7 e 28 dias a diferença é de aproximadamente 36%, e entre 28 e 90 dias é de 19%, sendo superior os valores

de módulo para as amostras curadas via úmida. Esse mesmo comportamento (Figura 11) já havia sido verificado por Neville (1997).

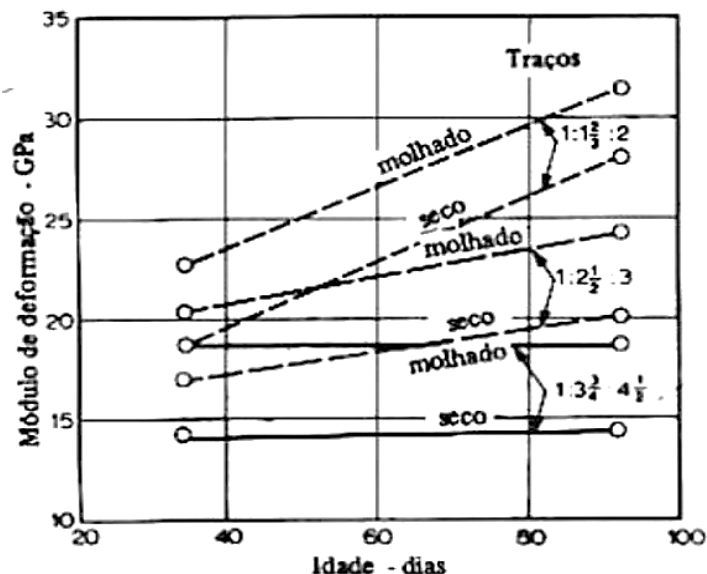


Figura 11 – Influência da umidade da amostra no módulo de deformação ao longo do tempo (Neville, 1997)

A partir da Figura 11 é possível verificar que nos três traços de concreto adotados, os corpos de prova ensaiados saturados alcançaram resultados de módulo de deformação mais elevados. Fonseca, Brito e Evangelista (2011), ao estudarem a influência do tipo de cura no módulo de elasticidade de concretos produzidos com agregado reciclado, concluíram que as condições de cura têm efeito significativo sobre o resultado de módulo, independentemente do tipo e teor de agregado utilizado, convergindo para o informado por L`Hermite (1970), Neville (1997) e Rodrigues e Figueiredo (2004).

Dal Molin e Monteiro (1996), no estudo do módulo de deformação em concretos de alta resistência (CAR), verificaram que a cura em ambiente úmido propicia valores de módulo na ordem de 3,4% superiores aos concretos acondicionados em ambiente seco. Outro dado importante do estudo conduzido pelos autores foi a constatação de que quanto maior a idade de ensaio, maior será o efeito do tipo de cura, sendo que aos 91 dias de idade a cura úmida acrescentou 6% aos valores de módulo de deformação, em relação aos valores obtidos sobre corpos de prova ensaiados secos, em cura ambiente.

O aumento do valor do módulo é o inverso do que acontece com a resistência à compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2014; CABRAL, 2014).

A razão para que o módulo de deformação aumente sob a condição saturada é a incompressibilidade da água. Quanto mais saturado estiver o corpo de prova menor será a deformação. Na resistência à compressão a água exercerá uma pressão hidráulica sobre as paredes dos poros que a contém, por isso é esperado haver redução da resistência à compressão.

Wang e Li (2007) e Kallel *et al.* (2017) destacam que os poros saturados restringem as deformações da matriz cimentícia, aumentando a rigidez. Também, com a evolução do processo de hidratação do cimento Portland há redução do número e do tamanho dos poros.

Assim a redução da resistência à compressão pelo efeito de saturação do corpo de prova determina a realização do ensaio em níveis mais baixos de carregamento, exercendo influência sobre o resultado de módulo.

Por outro lado, Zhou, Lydon e Barr (1995) destacam que o módulo de elasticidade aos 7 dias corresponde a 95% do concebido aos 28 dias. Diante dessa afirmação é necessário ressaltar a importância de uma cura cuidadosa nas primeiras idades, principalmente.

A NBR 5738 (ABNT, 2015) não contempla algumas situações especiais, como por exemplo, a cura a vapor. Grande parte das empresas que utilizam o sistema de cura a vapor opta por deixar os corpos de prova curando juntamente com os elementos concretados. Em alguns casos há requisitos para liberação de protensão, ou até mesmo de transporte, dos elementos concretados, sendo realizados ensaios de resistência à compressão e módulo ao final da cura, a fim de verificar se as peças estão aptas a serem movimentadas e a protensão aplicada. As empresas moldam corpos de prova para ruptura aos 28 dias de idade, sendo as amostras mantidas em cura úmida, após a cura prévia em ambiente de vapor.

Com base no estudo de Han e Kim (2004) é possível verificar a influência da temperatura de cura dos concretos em diferentes idades e para dois tipos de cimento Portland. Os concretos curados na temperatura de 10°C tem um

desenvolvimento do módulo mais lento até a idade de 7 dias, enquanto os que permaneceram em cura à 50°C desenvolvem o módulo mais rapidamente. Entretanto, é possível verificar que à temperatura ambiente (23°C) o módulo é superior na idade final de cura, aos 28 dias (Figura 12). Essas constatações vão ao encontro do estudo desenvolvido por Zhou *et al.* (2015), ao concluírem que para uma temperatura mais baixa, o módulo se desenvolve lentamente, enquanto que para uma temperatura mais alta ele atinge mais rápido o seu valor final.

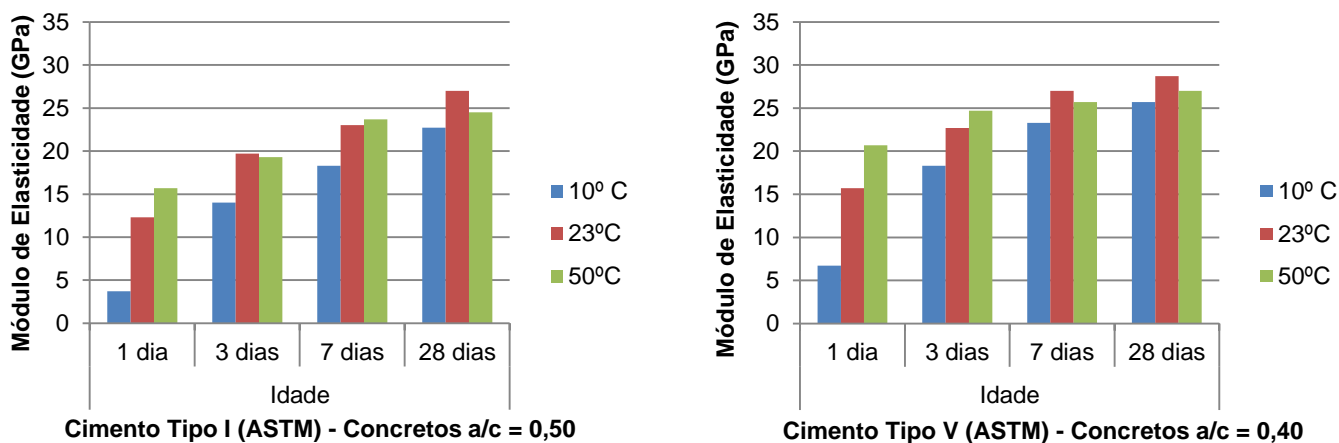


Figura 12 – Influência da temperatura de cura no módulo de elasticidade (Elaborado com base em Han e Kim, 2004)

Com base nos resultados apresentados é possível verificar que a temperatura durante a cura influencia diretamente no desenvolvimento do módulo. Os estudos de Abid *et al.* (2017) e de Kallel *et al.* (2017) verificaram que a elevação da temperatura de cura do concreto causa redução significativa no valor do módulo de deformação, sendo geralmente uma relação linear. Os autores explicam que isso ocorre em decorrência da elevação da microfissuração na zona de transição, da porosidade e da microestrutura do composto.

Corroboram, Vasconcelos e Giammusso (1998) ao destacarem que o valor do módulo é menor, em se tratando de cura térmica, pois a resistência final será inferior aos valores obtidos em cura à temperatura ambiente, aos 28 dias de idade do concreto.

2.2.1.3 Preparação das bases

A preparação das bases tem como principal função a melhoria do acabamento das faces que entram em contato com os pratos da prensa e da ortogonalidade das amostras a serem submetidas à compressão. Leal (2012) destaca que estas medidas servem para evitar transferências irregulares de tensões, que podem ocasionar erros na determinação da resistência e indiretamente nas medições de deformações. A Figura 13 relaciona o desvio encontrado na base do corpo de prova com a resistência à compressão.

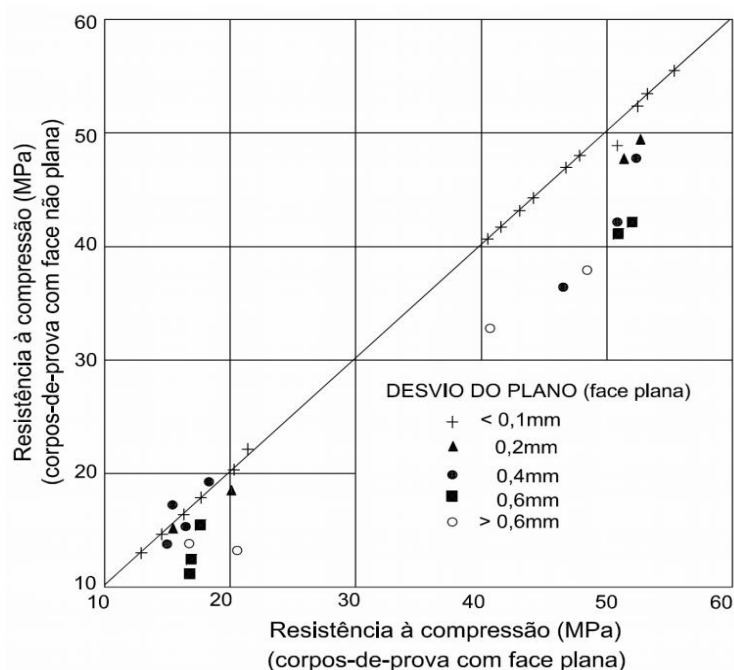


Figura 13 – Influência da planicidade na resistência à compressão (Bucher e Rodrigues Filho¹ citado por Bezerra, 2007)

Outro fator importante na definição dos valores de ensaio é a qualidade da preparação das superfícies de trabalho dos corpos de prova. A NBR 5738 (ABNT, 2015) faz menção à utilização de retíficas pneumáticas, a fim de promover o desgaste superficial das amostras, deixando-as planas e ortogonais ao eixo do cilindro. A Figura 14 apresenta o tipo de preparação da base utilizado nos ensaios de compressão e módulo dos laboratórios participantes das últimas três edições do Programa Interlaboratorial de Concreto organizado por Furnas Centrais Elétricas S.A (2015, 2016 e 2017).

¹ Bucher, H. R. E.; Rodrigues Filho, H. C. **Argamassas de enxofre para capeamento de corpos de prova**. Seminário sobre controle de resistência do concreto, IBRACON, São Paulo, 1983.

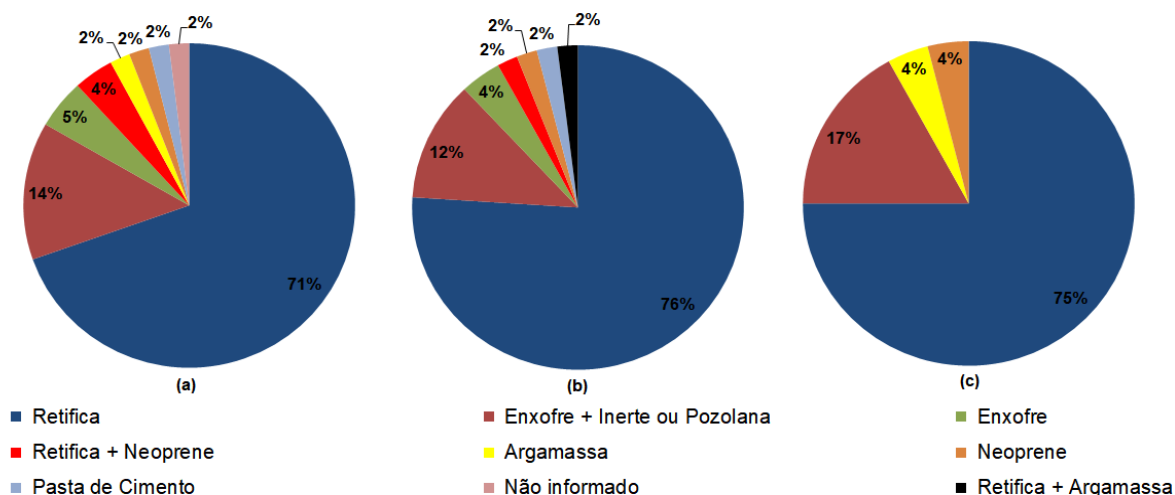


Figura 14 – Tipos de capeamento utilizados nos Programas Interlaboratoriais: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017)

A maior parte dos laboratórios utiliza como preparação das bases a retificação. Nesse sentido, o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da CIENTEC conduziu um estudo para determinar a melhor forma de preparação das amostras. Foram consideradas preparações por retificação e retificação mais capeamento, sendo parte realizado com argamassa de cimento Portland e areia natural e parte com pasta de enxofre. Foram considerados dois níveis de resistência à compressão, de 15 MPa e 40 MPa. As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados da análise estatística dos resultados obtidos.

Tabela 4 – Análise estatística dos diferentes tipos de capeamento para concreto $f_{ck} = 15$ MPa

| Fator Estudado | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor “p” | Significância |
|----------------------|--------|-----|-------|---------|-----------------|---------------|
| “Tipo de Capeamento” | 2,771 | 3 | 0,924 | 1,055 | 0,390030 | NS |
| Erro | 17,505 | 20 | 0,875 | - | - | - |
| Total | 20,276 | 23 | - | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor “p” – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Tabela 5 – Análise estatística dos diferentes tipos de capeamento para concreto $f_{ck} = 40$ MPa

| Fator Estudado | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor “p” | Significância |
|----------------------|--------|-----|------|---------|-----------------|---------------|
| “Tipo de Capeamento” | 17,88 | 3 | 5,96 | 0,909 | 0,454368 | NS |
| Erro | 131,12 | 20 | 6,56 | - | - | - |
| Total | 149,00 | 23 | - | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor “p” – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Para ambas as resistências, para um nível de confiança de 95%, não há diferença significativa entre os diferentes processos de capeamento.

No mesmo sentido, o estudo conduzido por Cupertino *et al.* (2008) indica não haver diferença estatística entre as bases preparadas por retificação ou

capeamento com argamassa, pasta de enxofre ou graute, não havendo também qualquer perturbação nos resultados devida às diferenças de formulação do material de capeamento.

Ainda o estudo do LMCC da CIENTEC foi complementado pela verificação da homogeneidade na impressão sobre papel carbono do mais efetivo contato entre os pratos da prensa e as superfícies de trabalho do corpo de prova, conforme apresentado nas Figuras 15, 16, 17 e 18.

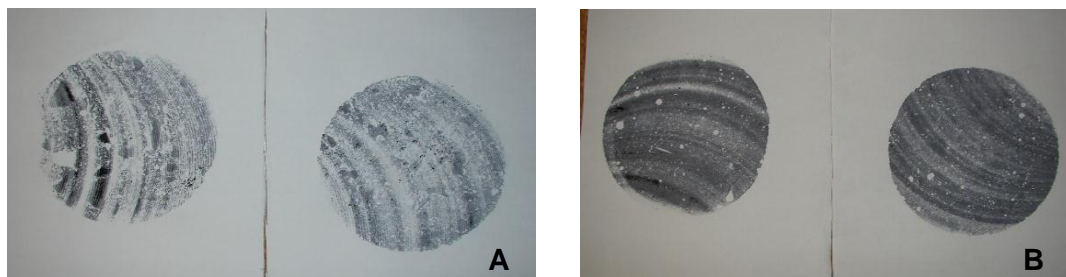


Figura 15 – Corpos de prova somente retificados

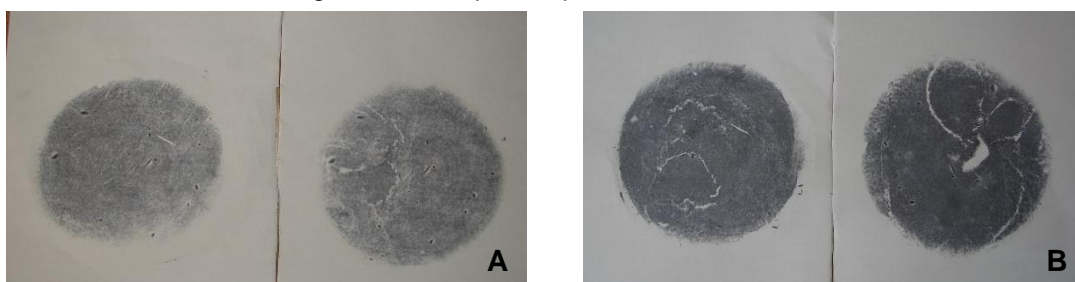


Figura 16 – Corpos de prova retificados + Pasta de Enxofre

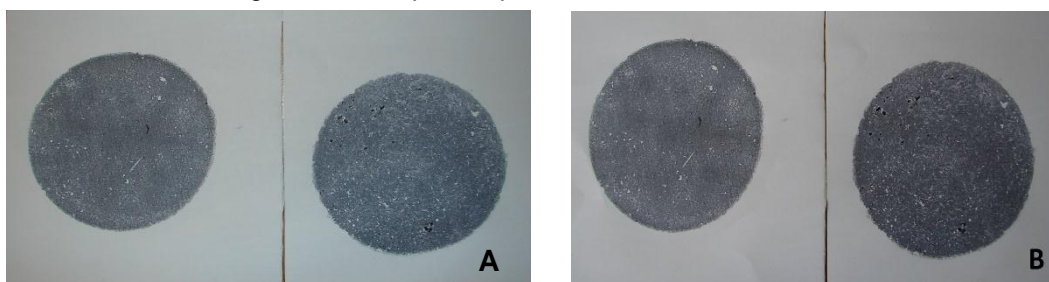


Figura 17 – Corpos de prova retificados + Argamassa com traço 1:1

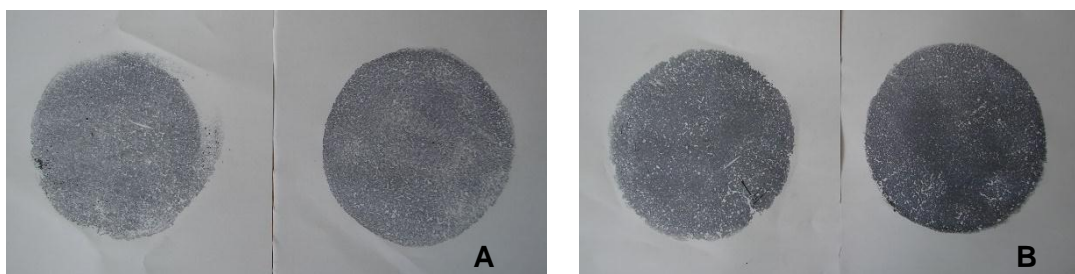


Figura 18 – Corpos de prova retificados + Argamassa com traço 1:3

Onde:

A: concreto de resistência de 15 MPa;

B: concreto de resistência de 40 MPa.

A observação das imagens apresentadas, permite verificar a área de contato existente entre os pratos da prensa e o corpo de prova. Evidentemente que a qualidade do processo adotado para preparação das superfícies de trabalho dos corpos de prova é de fundamental importância. No entanto, a retificação, garantindo o paralelismo entre as superfícies de trabalho dos corpos de prova e sua ortogonalidade em relação ao eixo vertical, com posterior capeamento, maximiza o contato entre o corpo de prova e os pratos da prensa. O processo simples de retificação, para ser executado adequadamente, exige muito tempo, mais do que o dispendido em processos de capeamento. Dependendo do nível de desgaste do disco diamantado e das condições de manutenção do equipamento, o acabamento poderá ser prejudicado fortemente, pois qualquer folga no eixo ao qual está acoplado o disco impedirá a retificação adequada, comprometendo os resultados a serem obtidos no ensaio, subestimando a resistência do concreto.

Mesmo que a análise estatística não acuse haver diferenças significativas na verificação da resistência à compressão medida pelo ensaio de corpos de prova preparados de diferentes maneiras, é necessário garantir a distribuição uniforme da carga de ensaio. A argumentação apresentada visa a permitir o entendimento de que diante de qualquer concentração de carga poderão ocorrer medidas de deformações diferenciadas entre os sensores que são dispostos em posição diametralmente oposta nos corpos de prova durante o ensaio, haja vista a fácil constatação de irregularidades no ensaio através da observação do aspecto de corpos de prova após a sua realização.

Em casos extremos, o corpo de prova apresenta ruptura em apenas um quadrante, permanecendo o lado oposto íntegro. Nessas condições a deformação medida no quadrante colapsado foi maior do que aquela medida pelo sensor posicionado na região que permaneceu íntegra. Certamente a resistência à compressão medida foi inferior à real que teria sido verificada se o ensaio não tivesse apresentado anomalias. Por essas razões, parte dos laboratórios procura trabalhar com o processo de retificação das bases e posterior regularização, via pasta de enxofre ou argamassa de cimento Portland.

Vale ressaltar que na prestação de serviços técnicos executados por alguns laboratórios de materiais de construção civil, ainda se observa que os ensaios são

realizados sem qualquer tratamento sobre a superfície do corpo de prova, o que compromete o resultado obtido.

Vieira *et al.* (2008) conduziram um estudo para verificar se há variações quando se realiza o capeamento em uma ou nas duas faces. O referido trabalho foi desenvolvido para três (03) diferentes níveis de resistência à compressão (C20, C30 e C40), demonstrando que a regularização das duas faces promove o aumento do módulo de elasticidade, sendo verificado um incremento máximo de 25% no concreto com resistência à compressão de 20 MPa e, no geral, a diferença é próxima de 8%.

2.2.2 Máquina de ensaio

O equipamento de compressão utilizado no ensaio para a determinação do módulo deve atender aos requisitos impostos pelo item 4.1 da NBR 8522 (ABNT, 2017), obedecendo os valores máximos admissíveis (indicação, repetitividade, reversibilidade, indicação de zero e resolução relativa) para a classe 1 ou 0,5, de acordo com a NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016), não havendo restrição sobre o tipo e capacidade do equipamento.

A Figura 19 apresenta a classe da máquina de ensaio dos laboratórios participantes das últimas três edições do Programa Interlaboratorial de Concreto.

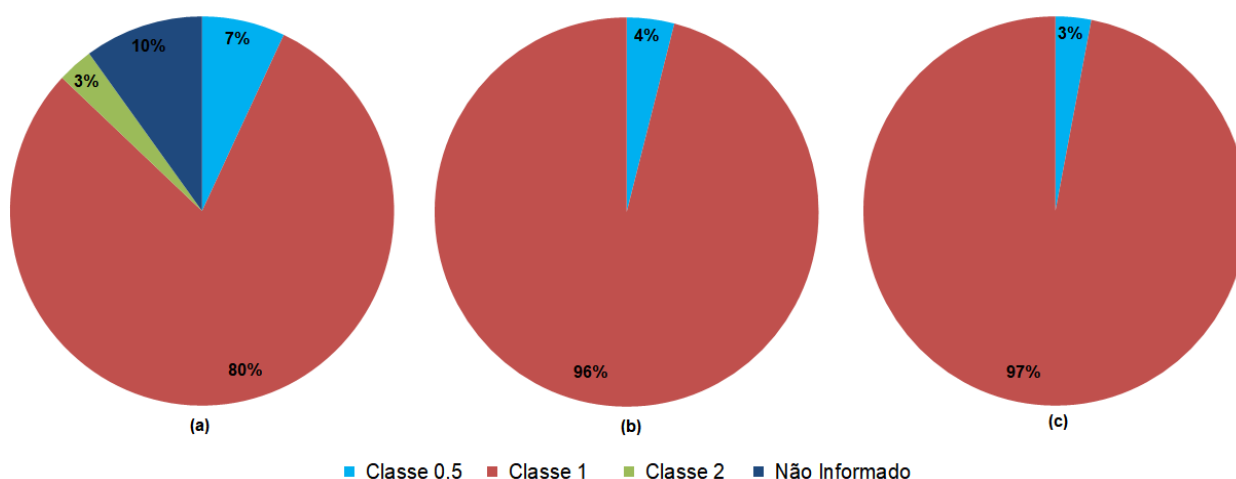


Figura 19 – Classe do equipamento de compressão: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017)

Em 2015 havia laboratórios realizando ensaios com equipamento fora da especificação da NBR 8522. Entretanto, nos últimos dois anos, houve evolução dos equipamentos, tendo sido empregadas somente prensas de classe 0,5 e 1.

Vale observar que a participação em programas interlaboratoriais é restrita a laboratórios acreditados perante a Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO e aos convidados pelo Comitê Técnico 01: Construção Civil (CT-01), representando todos eles uma pequena parcela do total de laboratórios em atividade no território nacional.

2.2.2.1 Capacidade e acionamento do equipamento

O processo de calibração conduzido pela NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016) deve atender à aferição para o uso abaixo de 20% da escala nominal dos equipamentos de compressão, uma vez que o ensaio de módulo leva em consideração a tensão de 0,5 MPa, para garantir a exatidão do ensaio.

Outro fato importante a ser observado é que em nenhum momento a NBR 8522 (ABNT, 2017) impõe a verificação do requisito de reversibilidade. A única menção a esse requisito está na NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016) que delega a opção de calibração ao usuário, conforme a necessidade do laboratório, não tornando obrigatório a verificação desse, tanto para a classe 1, quanto para a classe 0,5. Entretanto, a verificação da reversibilidade de um equipamento empregado em ensaio de módulo é de suma importância, pois o erro de exatidão está ligado também ao ciclo de carregamento e descarregamento.

A verificação do erro de reversibilidade comprova os limites impostos pela NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016), com o intuito de avaliar a aptidão do equipamento para o ensaio.

Vogt (2006) destaca que a máquina de ensaio pode contribuir para leitura dos deslocamentos, e conseqüentemente da deformação. Caso não tenha a rigidez necessária para o nível de carregamento exigido, conduz a leituras de deformação errôneas, alterando assim o valor determinado para o módulo. De Marchi (2011) destaca que além da instabilidade da máquina de ensaio, isso ocorre também devido às imperfeições e ao acomodamento da base dos corpos de prova junto aos pratos de apoio.

Gujel, Kazmierczak e Masuero (2017) citam que a elevada resistência dos concretos atuais fazem com que as prensas tenham uma capacidade de carga elevada ($\approx 2000\text{kN}$), obtendo como consequência a elevação no valor da carga

mínima, onde é possível obter precisão da leitura da carga aplicada. Dessa maneira, a probabilidade de ocorrer uma leitura errônea da deformação é elevada. De Marchi (2011) destaca que quanto maior a capacidade nominal, maior a dificuldade de estabilizar o carregamento a uma tensão baixa, a fim de verificar as deformações de forma correta.

De acordo com a Figura 20 é possível verificar a perturbação que ocorre em torno do ponto inicial de tensão (0,5 MPa), referenciado para a determinação do módulo de deformação do concreto.

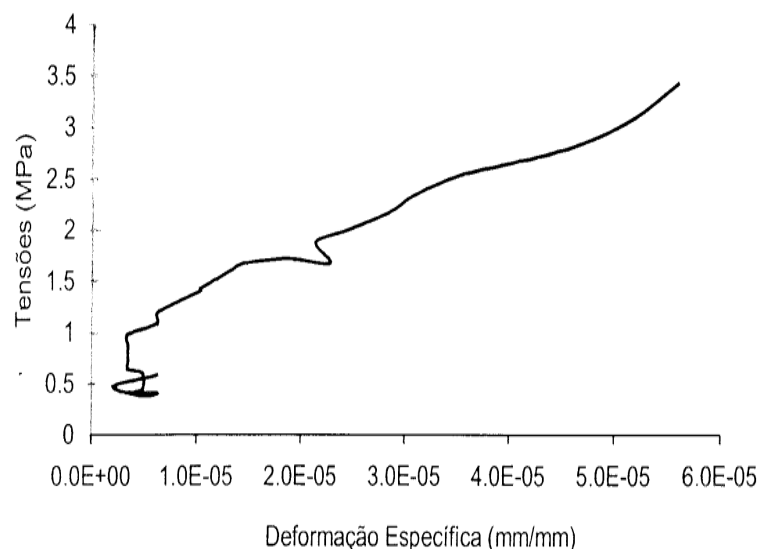


Figura 20 – Perturbação: deformação *versus* tensão (Pereira Neto² citado por Montija, 2007)

Gujel, Kazmierczak e Masuero (2017) defendem a adoção de um novo patamar de carregamento inicial, visto a dificuldade para estabilização da tensão aplicada (0,5 MPa). Os autores justificam, pois nesse trecho a curva apresenta comportamento linear, não havendo impedimentos para tal prática.

De Marchi (2011) ressalta que, nessas situações, muitas vezes é necessário recorrer a células de carga, com capacidade menor, a fim de obter a confiabilidade necessária de medidas de deformações e de tensões mais baixas. Outro recurso a ser adotado é o uso de máquinas de ensaio com acionamento assistido, os equipamentos servo-controlados. O uso deste tipo de equipamento propicia taxas de aplicação de carregamento, tanto na aproximação do corpo de prova, quanto na aplicação de carga na amostra de maneira controlada.

² PEREIRA NETO, P. M. **Efeito do agregado graúdo em algumas propriedades do concreto de alta resistência com microsilica**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

Através da Figura 21 é possível verificar que a maioria dos laboratórios de ensaios em materiais de construção utilizam prensas servo-controladas, ou elétricas, no ensaio do módulo de elasticidade.

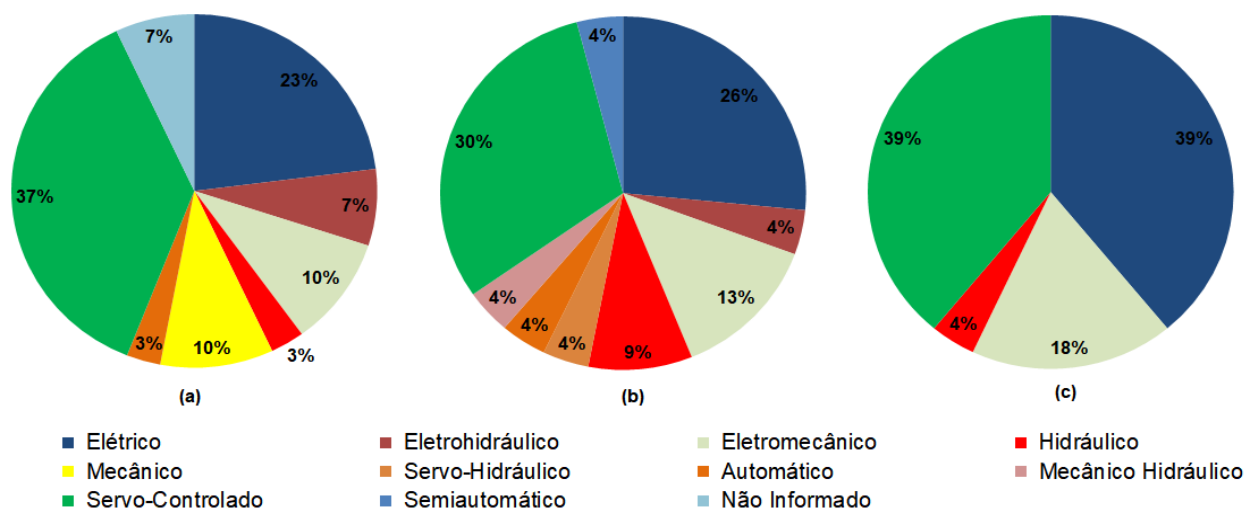


Figura 21 – Tipo de acionamento do equipamento de compressão: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017)

Entretanto, ainda há utilização de equipamentos totalmente mecânicos. Equipamentos analógicos de leitura direta sempre representarão um fator de erro a ser considerado.

2.2.2.2 Velocidade de carregamento

A NBR 8522 (ABNT, 2017) especifica que a velocidade de carregamento dos corpos de prova deve obedecer a taxa de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s.

Coutinho e Gonçalves (1994) e Vogt (2006) explicam que a deformação gerada no corpo de prova depende do nível da tensão e da velocidade de aplicação de carga. Com base nisso, verifica-se a necessidade de respeitar rigorosamente a taxa especificada em norma, a fim de não perturbar os resultados gerados, a resistência à compressão e as deformações.

Através da Figura 22 é possível verificar que quanto maior a taxa de aplicação da carga, menor será a deformação para um mesmo nível de tensão, resultando em um valor maior de módulo. Furnas (1997) explica que este efeito é oriundo da menor capacidade de propagação das fissuras e da consequente impossibilidade de acomodação microestrutural das deformações. Já nas taxas de carregamento

lento, Cabral (2014) afirma que o efeito elástico sobrepõe aos de fluência e o módulo tende a diminuir.

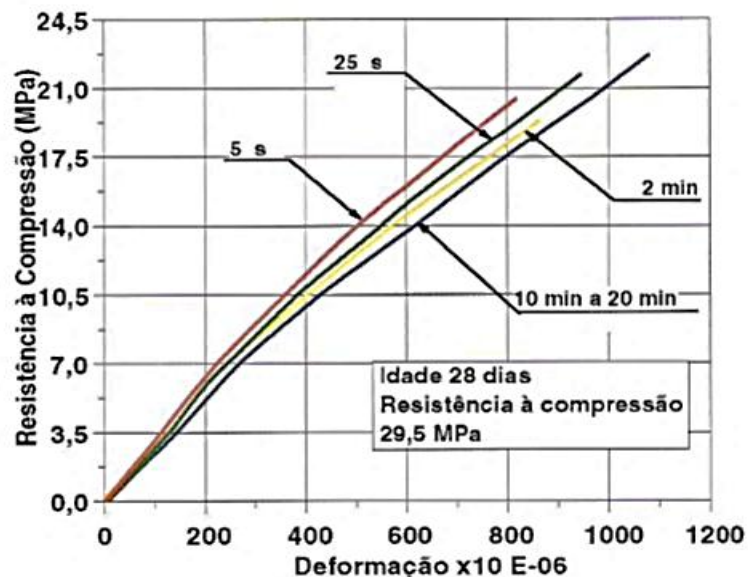


Figura 22 – Influência da velocidade de carregamento (FURNAS, 1997)

Na busca pela identificação de uma possível interação entre o tipo de preparo das faces das amostras e a velocidade de carregamento, Bezerra (2007) verificou que a resistência à compressão cresce de acordo com o aumento da taxa de aplicação de carregamento, independentemente do tipo de preparação da base (enxofre ou neoprene).

Cândido, Borges e Bittencourt (2007), a fim de simular uma situação real, aplicaram uma carga permanente num período de 90 dias, cujo valor corresponda a 40% da resistência à compressão, em corpos de prova com resistências de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa. Dessa forma avaliaram a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, aos 7 e 28 dias após a remoção do carregamento (90 dias). A Figura 23 apresenta os resultados obtidos no estudo para a resistência à compressão, indicando não haver variação nesta propriedade.

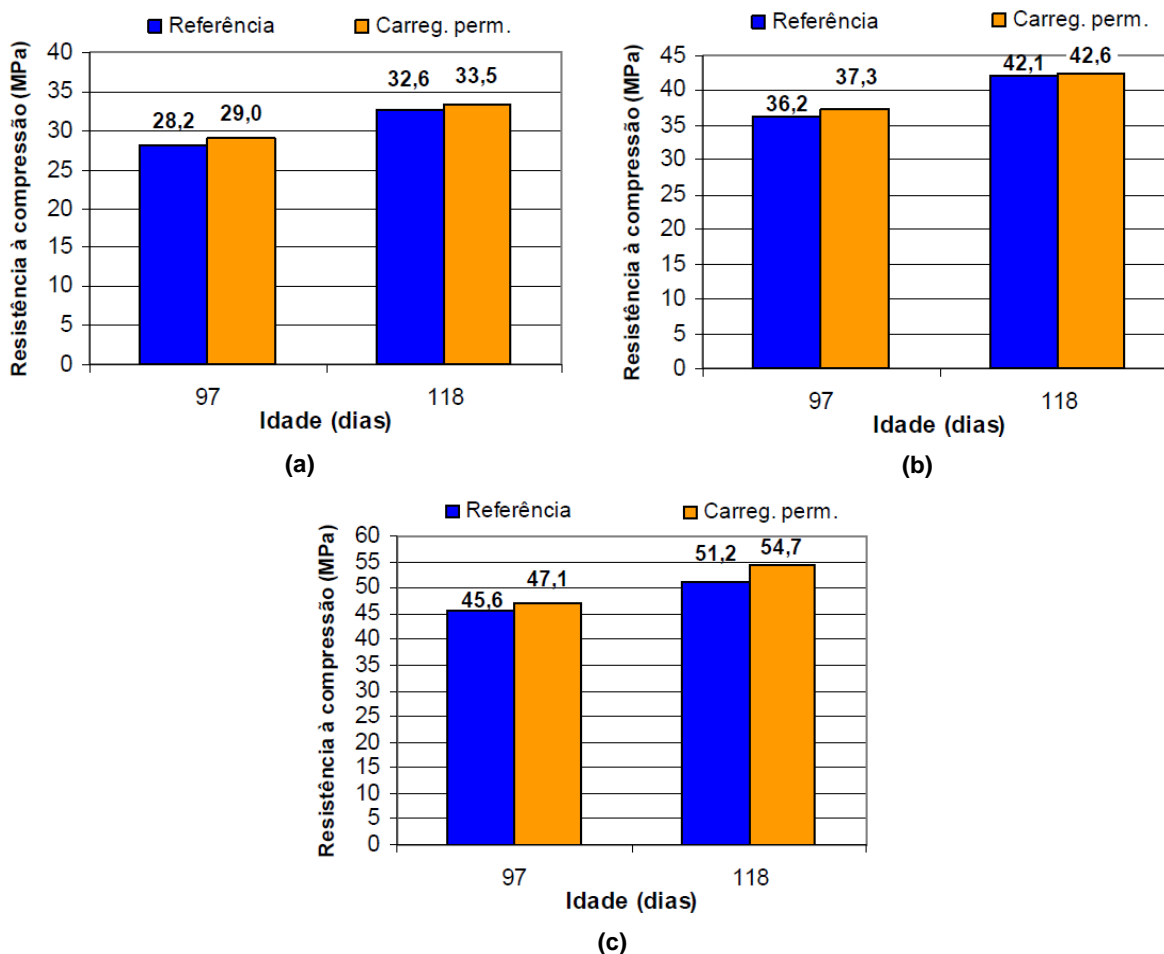


Figura 23 – Influência do carregamento permanente na resistência à compressão: (a) $f_{ck} = 20$ MPa, (b) $f_{ck} = 30$ MPa e (c) $f_{ck} = 40$ MPa (Cândido, Borges e Bittencourt, 2007)

Os resultados apresentados na Figura 24 mostram que, após a retirada do carregamento (90 dias), os ensaios aos 7 e 28 dias das amostras apresentaram elevação do módulo de elasticidade, quando comparados aos valores de referência, sem carregamento permanente.

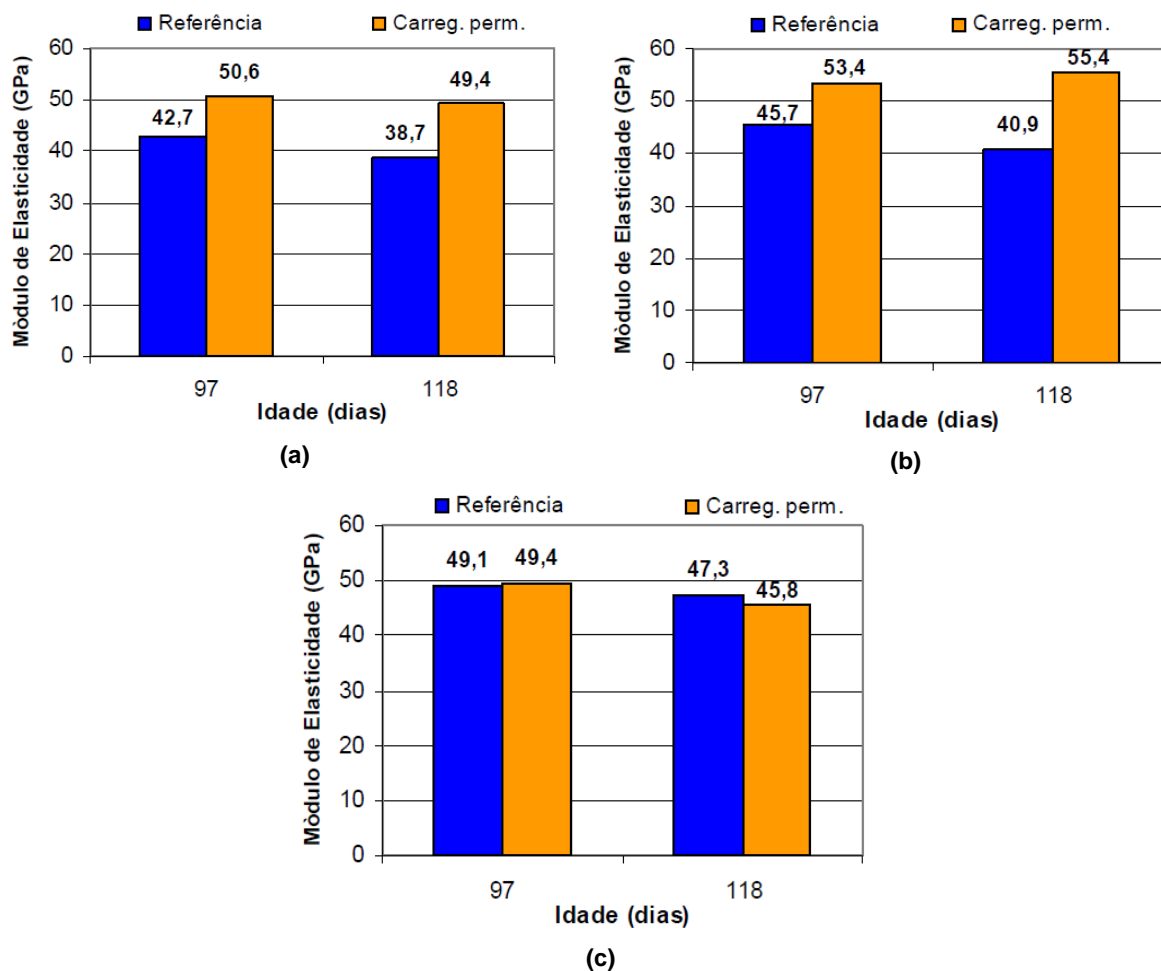


Figura 24 – Influência do carregamento permanente no módulo de elasticidade: (a) $f_{ck} = 20$ MPa, (b) $f_{ck} = 30$ MPa e (c) $f_{ck} = 40$ MPa (Cândido, Borges e Bittencourt, 2007)

Cândido, Borges e Bittencourt (2007) explicam que isto acontece em função da deformação plástica ser irreversível, à qual é gerada pelo efeito da fluência, concluindo que a resistência à compressão não é alterada (Figura 23), os corpos de prova apresentam uma tendência a deformar menos durante o ensaio, em função da fluência, e conseqüentemente, o valor do módulo de elasticidade será maior.

Por outro lado, Vieira (2008) simulou o pré-carregamento de corpos de prova com diferentes taxas de carregamento (0%, 25%, 50% e 75%) em idades precoces (1, 3 e 7 dias), sendo ensaiados normalmente as amostras aos 28 dias. A autora comprovou que em idades menores a estrutura apresenta resistência à compressão suficiente, porém não há módulo de elasticidade que resista a esse efeito, o qual é melhorado à medida em que a hidratação evolui. A autora conclui que a deformação instantânea ocorre imediatamente após a retirada do

escoramento da estrutura concretada, e em idades iniciais será irreversível, obtendo como consequência, fissuras ao longo do tempo.

2.2.3 Medidores de deformação

Barbosa (2009) afirma que os equipamentos medidores de deformação têm influência sobre o valor do módulo. Neste tópico serão abordados os aspectos envolvidos com o posicionamento, a base de medida e os tipos de medidores, no resultado final.

De acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), a base de medida deve ser definida ao longo da geratriz da amostra, equidistante das extremidades do corpo de prova. A orientação da NBR 8522 (ABNT, 2017) visa a eliminar as tensões residuais oriundas do contato do corpo de prova com os pratos de apoio do equipamento de compressão, permitindo, assim, a geração apenas de um esforço de compressão.

A Figura 25 permite visualizar que o terço médio é isento de esforços laterais, não havendo contenção, de maneira que nessa região deverão ocorrer as maiores deformações. Por dedução, é possível, ainda, afirmar que o mau posicionamento dos medidores poderá considerar como referência regiões do corpo de prova não completamente livres de restrições à deformação.

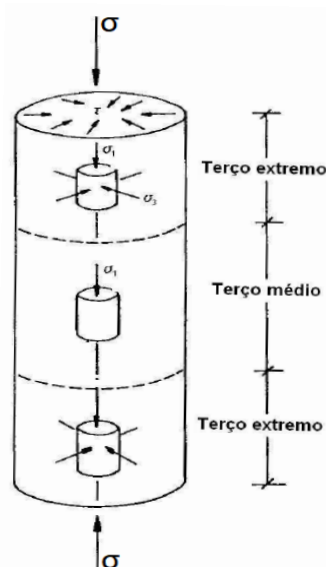


Figura 25 – Distribuição dos esforços no corpo de prova (Kotsovos e Pavlovic³ citado por Montija, 2007)

³ KOTSOVOS, M. D; PAVLOVIC, M .N. **Structural concrete: finite-element analysis for limit-state design**. London: Thomas Telford, 1995.

Torrenti, Boulay e Puch (1994) citam que as deformações obtidas no eixo central das amostras são em média 55% menores do que as verificadas na superfície. Esse efeito pode ser constatado por Martins (2008) ao relatar que há disparidade entre os valores de módulo de deformação determinados com o uso de medidores de deformação de superfície e de extensômetros embutidos nos corpos de prova.

2.2.3.1 Base de medidas

A base de medidas é definida como a distância entre dois pontos, pelo contato dos medidores, onde são realizadas as medições de deslocamento. Segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017) ela deve ter comprimento no mínimo de dois terços do diâmetro ($2/3$) e no máximo o diâmetro do corpo de prova.

Cupertino *et al.* (2007) avaliaram esses limites de base de medida recomendada por norma. Os autores comprovaram que estatisticamente não há diferença nos resultados de módulo de elasticidade, tanto para corpos de prova (100 x 200) mm como para os (150 x 300) mm.

Entretanto no item 4.2.1 da NBR 8522 (ABNT, 2017) é ressaltado que desde que seja comprovada a eficácia, podem ser utilizadas outras bases de medida.

2.2.3.2 Tipos de medidores

Os medidores de deformação devem permitir a minimização da influência do operador. Os medidores de deformação mais utilizados são elétricos, compressômetros, mecânicos e LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*).

Na Figura 26 é possível verificar que os compressômetros e medidores de deformação elétricos são os mais utilizados nos Programas Interlaboratoriais. Ainda, merece destaque o crescimento, no ano de 2017, do uso dos medidores do tipo LVDT.

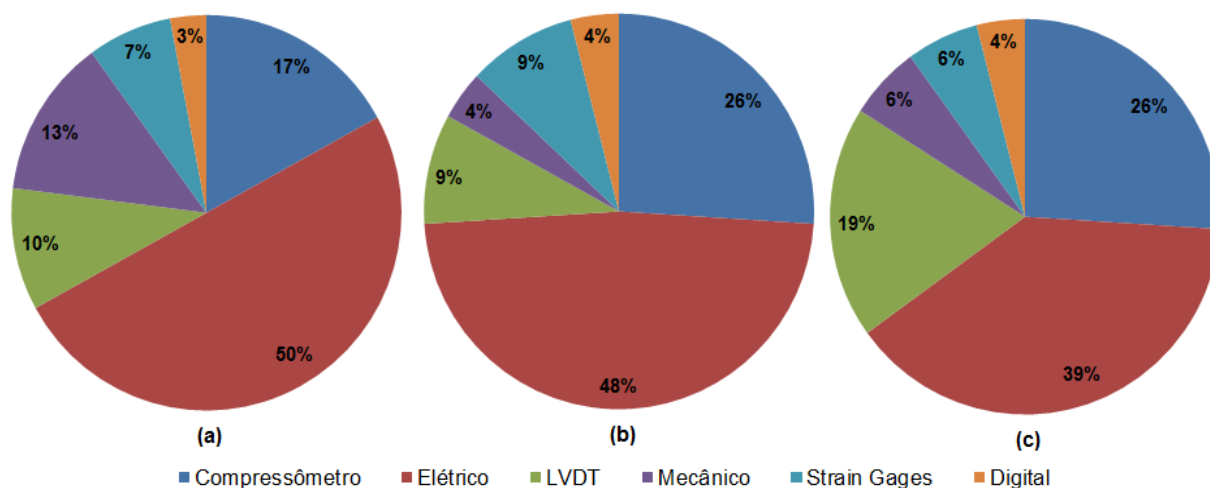


Figura 26 – Tipos de medidores de deformação utilizados nos Programas Interlaboratoriais: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017 (Furnas, 2015, 2016 e 2017)

Os principais tipos de medidores de deformação estão ilustrados nas Figuras 27, 28, 29 e 30.

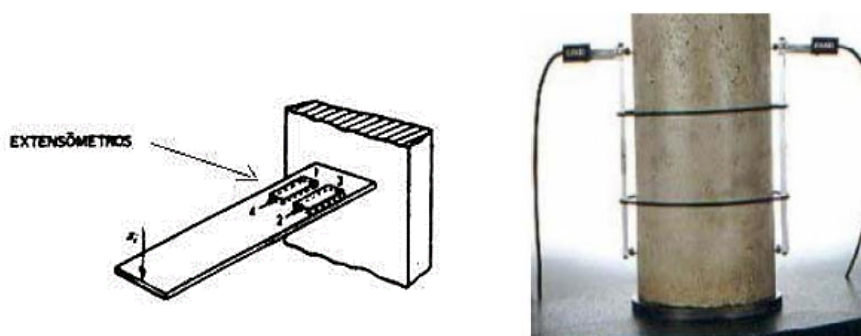


Figura 27 – Clip Gages (Montija, 2007; Cupertino *et al.*, 2007)



Figura 28 – Strain Gages (Montija, 2007; Cupertino *et al.*, 2007)



Figura 29 – LVDT (Montija, 2007)



Figura 30 – Compressômetros (Montija, 2007)

Araújo, Guimarães e Geyer (2012) e Lenz (2016) ressaltam que os medidores de deformação elétricos têm vantagens sobre os extensômetros elétricos de colagem superficial (*strain gages*), que uma vez utilizados devem ser descartados, aumentando o custo do ensaio, enquanto que os *clip gages*, LVDT e compressômetros são reutilizáveis.

Diversos estudos foram realizados a fim de verificar a aptidão dos equipamentos aos resultados obtidos nos ensaios de módulo de deformação.

Araújo, Guimarães e Geyer (2012) constataram que os extensômetros elétricos de fixação externa (*clip gages*) e os extensômetros elétricos de colagem superficial (*strain gages*) têm leituras mais consistentes, ressaltando também menor necessidade de intervenção externa no decorrer do ensaio, minimizando, assim, possíveis erros de leitura, quando comparados ao compressômetro mecânico e ao transdutor diferencial de variação linear (LVDT). A Figura 31 apresenta os resultados do estudo dos autores supracitados.

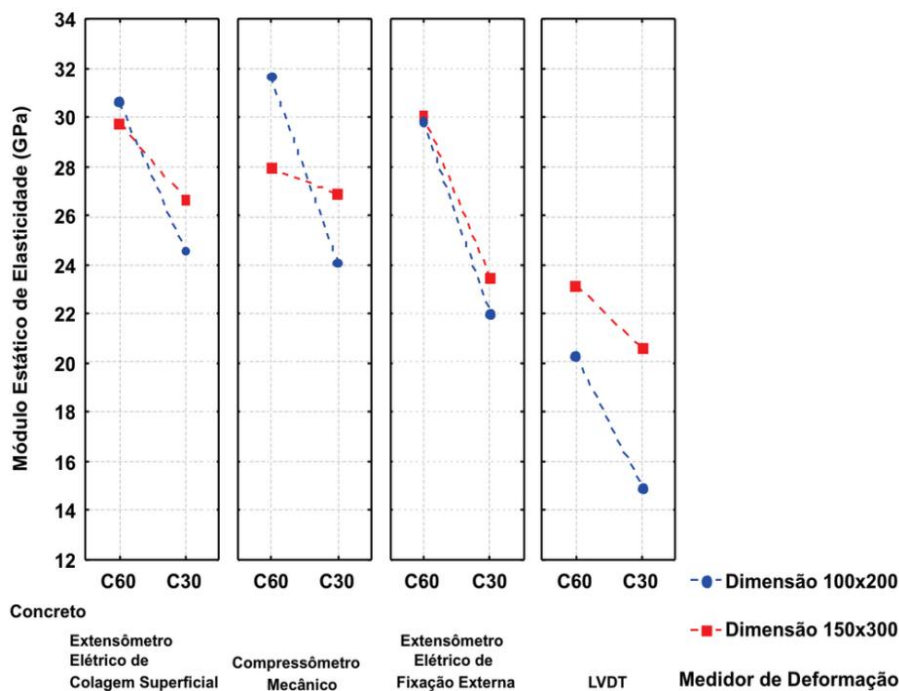


Figura 31 – Influência dos medidores de deformação (Araújo, Guimarães e Geyer, 2012)

Com base na Figura 31, Araújo, Guimarães e Geyer (2012) concluíram que o uso de medidores de deformação do tipo LVDT conduz à obtenção de valores de módulo de elasticidade inferiores aos obtidos a partir do emprego de outros tipos de medidores de deformação, para ambas as classes de resistência à compressão estudadas (C30 e C60), independente da dimensão dos corpos de prova. Corroborando, Cupertino *et al.* (2007) destacam que os extensômetros elétricos apresentam resultados com maior homogeneidade em comparação aos obtidos com os LVDT, tanto em corpos de prova com dimensão (100 x 200) mm, como em corpos de prova de (150 x 300) mm.

Montija (2007) estudou diversos medidores de deformação e comprovou que os maiores desvios de leitura estão relacionados ao uso de compressômetro. Vieira (2008) cita que os LVDT possuem certo nível de variabilidade. Montija (2007) e Lenz (2016) afirmam que os *clip gages* conduzem a leituras de deformações mais precisas.

Segundo Aguilar *et al.* (2006), para materiais que apresentam alto valor de módulo, com pequena deformação, é necessária a utilização de medidores de deformação mais sensíveis que possam garantir a estabilidade e precisão das leituras.

2.3 VARIABILIDADE DA DOSAGEM DOS MATERIAIS

Considerando concretos produzidos apenas com um agregado graúdo, o esqueleto granular fica definido pela determinação do teor de argamassa, o que pode ser feito de diversas maneiras, desde apenas observação visual e consideração de aspectos puramente empíricos, como o método conhecido como IPT/EPUSP, ou através da minimização do volume de vazios da mistura cuja consecução pode ser efetivada através da composição granulométrica, ou pelo volume de vazios. Diferentes procedimentos podem ser observados em: Petrucci (1979), Helene e Terzian (1993), Rodrigues (1998), Recena (2011) e Recena (2017).

O trabalho conduzido por Recena (2011) sobre o método de dosagem de concretos pelo volume de pasta merece destaque, pois teve como um dos objetivos o aperfeiçoamento do método “Alemão Simplificado” para a determinação do teor de argamassa. Esse método é uma adaptação de um roteiro apresentado por Richard Gür em *Der Beton, Herstellung und Gefüge*, Berlin 1926, ao qual foi desenvolvida uma sistemática didática com o auxílio de equipamentos usuais (recipiente plástico, balança e água) para a determinação do teor de argamassa ideal para um concreto convencional (RECENA, 2011).

A definição do teor de argamassa está relacionada à continuidade da curva granulométrica e à forma do agregado graúdo. Quanto menor o índice de vazios, menor a exigência de argamassa na mistura. Entretanto, as características de uso do concreto devem ser ajustadas às condições de transporte, lançamento e adensamento, o que corresponde aos aspectos subjetivos de uma dosagem. O teor de argamassa, em massa, dentro do campo dos concretos para fins estruturais tem como limites usuais valores entre 48% e 55% (RECENA, 2011).

O teor de água sobre materiais secos (H%) é função da superfície específica da mistura e da consistência requerida, sendo as variáveis intervenientes, o teor de argamassa, a textura e a forma do grão, tanto do agregado miúdo como do graúdo. A utilização de aditivos redutores de água permite obter maior plasticidade com um menor teor de água sobre materiais secos (H%).

A dependência entre a resistência à compressão e a relação água/cimento foi descoberta por Abrams (1918) e difundida no meio técnico-científico como a “Lei de Abrams”, a qual constatou que a resistência depende inversamente da relação água/cimento. A tradução do documento original permite inferir o seguinte enunciado:

“para um determinado concreto, materiais e condições de ensaio, a quantidade de água de mistura usada determina a resistência do concreto, desde que a mistura apresente plasticidade”.

A lei enunciada por Abrams (1918) é válida para o horizonte dos concretos trabalháveis, ou seja, aqueles que não sejam tão secos que não possam ser adensados adequadamente ou tão fluidos que conduzam à situação de segregação.

Tomosawa e Noguchi (1993), Hashin e Monteiro (2002), Topçu e Uruglu (2007), Vieira (2008), Leal (2012), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014), Gidrão (2015) e Tibbetts *et al.* (2018) configuram o concreto como um material compósito, constituído basicamente por três fases: a pasta, o agregado e a zona de interação entre esses dois, denominada de zona de transição. A Figura 32 apresenta a estrutura formada pela composição do concreto.

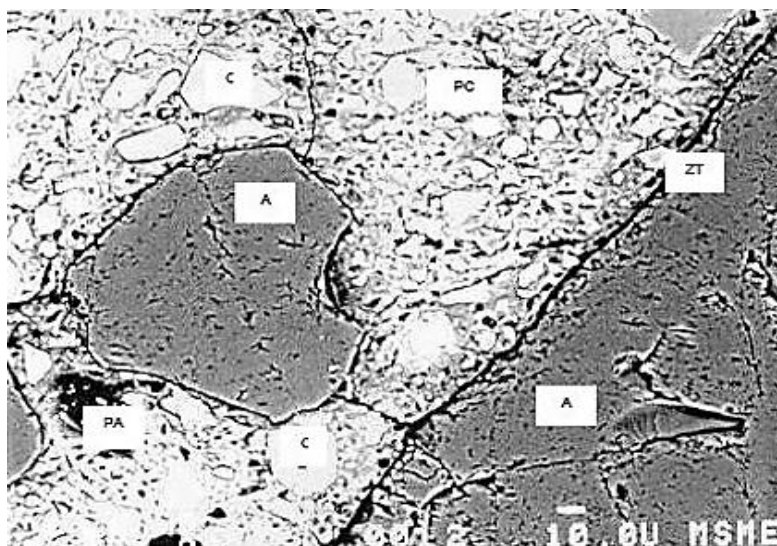


Figura 32 - Microestrutura do concreto (Dal Molin, 1995)

Onde:

A: agregado;

C: grão de cimento anidro;

PC e PA: vazios ou poros;

ZT: zona de transição.

Com base na dosagem definida para o concreto é possível afirmar que qualquer alteração na proporção ou na qualidade de qualquer um dos constituintes produzirá efeitos sobre a mistura. Alterações no volume de pasta, introduzidas por variações na quantidade de água, de cimento, de ar, ou de sua combinação, determinará mudanças nas características do concreto. Aïtcin e Mehta (1990); Baalbaki *et al.* (1991); Yang e Huang (1996); Li *et al.* (1999); Wu *et al.* (1999); Wu *et al.* (2001); Nadeau (2003) e Al-Orami, Taha e Hassan (2006), Vieira (2008), Gidrão (2015), Lenz (2016) e Tibbetts *et al.* (2018) apontam que as deformações do concreto têm relação direta com as características e as proporções dos materiais empregados nas misturas.

Lutz, Monteiro e Zimmerman (1997); Li *et al.* (1999); Vieira (2008), Barbosa (2009); Ghebrab e Soroushian (2011); Zhou *et al.* (2015) e Tibbetts *et al.* (2018) descrevem que a deformabilidade do concreto está ligada ao volume ocupado pelo agregado graúdo e ao volume de pasta, pelas características de deformação de cada constituinte e da zona de transição.

Por mais homogênea e controlada que seja a mistura do compósito, a distribuição espacial dos compostos na mistura endurecida altera o comportamento frente aos esforços e às deformações impostas ao concreto (MONTIJA, 2007).

Nos itens a seguir, será realizado um estudo particularizado das três fases constituintes do concreto: a pasta, o agregado e a zona de transição.

2.3.1 A Pasta

A pasta é constituída essencialmente por água e cimento Portland, podendo ser adicionados aditivos químicos e adições minerais, além de uma certa quantidade de ar, na forma de bolhas.

Taylor (1997) descreve que o cimento Portland é constituído, em sua essência, pelo clínquer, o qual é o resultado da fusão, em torno de 1400°C, entre uma rocha carbonática e argila com teores consideráveis de óxidos de sílica, alumínio e ferro. Scrivener e Nonat (2011) citam que a partir desses óxidos há formação de quatro compostos básicos no clínquer: o C_3S (silicato tri-cálcico), C_2S (silicato di-

cálcico), ora denominados de fase silicatos; o C_3A (aluminato tri-cálcico) e o C_4AF (ferro-aluminato tetra-cálcico), correspondentes à fase dos aluminatos.

Taylor (1997) descreve que o C_2S , o C_3A e o C_4AF correspondem, respectivamente, de 15 a 30%, de 5 a 10% e de 5 a 15% da massa do clínquer.

De acordo com Taylor (1997), Bullard *et al.* (2011), Scrivener, Juilland e Monteiro (2015) o composto com maior participação no clínquer de cimento Portland é o C_3S (silicato tri-cálcico), normalmente com 50 a 70%, em massa. Manzano, Dolado e Ayuela (2009) citam que o módulo de elasticidade dos cristais de C_3S é próximo de 140 GPa.

O clínquer pode ser misturado com adições minerais, e sempre recebe um pequeno teor de sulfato de cálcio. A inclusão de adições minerais junto ao clínquer visa a alterar propriedades no estado fresco e endurecido, bem como a reduzir o custo de produção do cimento. O sulfato de cálcio regula os tempos de início e fim de pega, através do controle da hidratação do C_3A (TAYLOR, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O estudo conduzido por Girardi (2014), a respeito da variabilidade dos cimentos que abasteceram o Rio Grande do Sul, no período de 1992 a 2012, demonstrou que cimentos de mesmo tipo e classe de resistência podem apresentar variações de grande amplitude. Recena (2017) destaca que, por ser um produto comercial, o cimento apresenta variações e merece atenção, ainda mais pelo fato de que algumas empresas chamadas misturadoras fazem apenas a mistura de adições minerais e cimentos comerciais. A Tabela 6 apresenta a composição básica dos diferentes tipos de cimento comercializados no Brasil, segundo as normas brasileiras.

Tabela 6 - Composição básica do cimento Portland brasileiro (NBR 16697, 2018)

| Tipo | Sigla | Classes de resistência | Componentes (%) | | | |
|--------------------------|------------|------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| | | | Clínquer + Sulfato de Cálcio | Escória granulada de alto forno | Material Pozolânico | Material Carbonático |
| Comum | CP I | 25/32/40 | 95-100 | 0-5 | | |
| | CP I S | | 90-94 | 0 | 0 | 0-6 |
| Composto com Escória | CP II E | | 51-94 | 6-34 | 0 | 0-15 |
| Composto com Fíler | CP II F | | 75-89 | 0 | 0 | 11-25 |
| Composto com Pozolana | CP II Z | | 71-94 | 0 | 6-14 | 0-15 |
| Alto - Forno | CP III | | 25-65 | 35-70 | 0 | 0-10 |
| Pozolânico | CP IV | | 45-85 | 0 | 15-50 | 0-10 |
| Alta Resistência Inicial | CP V - ARI | | - | 90-100 | 0 | - |

Verifica-se haver diferentes classes de resistência à compressão e de composição. Além dos tipos apresentados na Tabela 6 os cimentos podem apresentar resistência a sulfatos e baixa liberação de calor durante a hidratação, tendo acrescentadas as siglas “RS” e “BC”, respectivamente, à identificação geral.

Dessa maneira é possível inferir que, mantida a relação água/cimento como constante, para diferentes tipos e classes de resistência do cimento Portland, altera-se o comportamento da matriz cimentícia, ou seja, da pasta. Os compostos presentes no clínquer tem comportamento distintos, e a quantidade de cada composto determina alterações nas características da pasta obtida.

Por outro lado, a porosidade de uma pasta de cimento está diretamente interligada à quantidade de água utilizada na mistura (TAYLOR, 1997; MEHTA e MONTEIRO, 2014; XIE *et al.*, 2015) com impacto direto sobre a deformabilidade que é influenciada pela rigidez, uma vez que, ao serem introduzidos vazios, diminuirá a quantidade de material sólido na unidade de volume da mistura. Kocáb *et al.* (2017b) verificaram que teores de ar aprisionado entre 3,3% e 4,5% causam reduções nos valores do módulo do concreto de até 36,5%.

2.3.1.1 Hidratação do cimento Portland

Inicialmente os compostos estão diluídos num sistema aquoso que aos poucos promove a dissolução dos íons: cálcio, sílica, alumínio e ferro. A hidratação pode ser entendida como a transformação do composto cimentício em um sólido rígido e resistente, sem necessidade de interferência externa, ocorrendo em temperatura ambiente e com uma mínima alteração de volume, devido à

formação de cristais e à evaporação de parte da água (SCRIVENER e NONAT, 2011).

Os grãos de cimento são dissolvidos da superfície para o núcleo, ou seja, quanto maior a dimensão do grão, menor é a velocidade de dissolução desses íons (NEVILLE e BROOKS, 2013). Nesse sentido a hidratação será mais lenta.

A reação que ocorre entre a água e os silicatos (C_3S e C_2S) resultará na formação de um gel, produto da hidratação da sílica e do cálcio, conhecido como C-S-H (silicato de cálcio hidratado). Taylor (1997) e Bullard *et al.* (2011) ressaltam que o C_3S domina o desenvolvimento do gel de silicato hidratado, o principal produto da hidratação e responsável pela resistência. Já Scrivener e Nonat (2011) citam que a reação do C_2S será significativa após 10 dias ou mais de hidratação, devido à baixa reatividade do composto nas primeiras idades. De acordo com Manzano, Dolado e Ayuela (2009) e Mehta e Monteiro (2014), o volume de sólidos ocupado pelo C-S-H na pasta de cimento hidratada é de aproximadamente 60 a 70%.

Powers (1966) e Bullard *et al.* (2011) citam que esses cristais são repletos de ligações iônicas e covalentes, tendo distâncias entre cristais aproximadamente de 2nm, o que favorece o travamento entre os cristais e eleva a intensidade das forças de Van der Waals. Dessa forma, os cristais de silicato hidratado (C-S-H) são os principais responsáveis pela resistência mecânica dos materiais à base de cimento Portland.

No estudo de Hu e Li (2014), o valor médio do módulo de elasticidade para o gel de C-S-H foi de 25,9 GPa, utilizando cimento Portland Tipo I (ASTM C150) com relação água/cimento de 0,40. Há de se destacar que Manzano, Dolado e Ayuela (2009) afirmam que as propriedades elásticas do C-S-H são definidas através de sua porosidade, atribuindo grande importância ao comprimento da cadeia de silicato na determinação da elasticidade desse composto.

Outro composto gerado durante a hidratação do cimento Portland é o hidróxido de cálcio, $Ca(OH)_2$, também chamado de portlandita (CH). Paulon e Monteiro (1991) verificaram que esse composto é encontrado em grande quantidade na zona de transição, entre a pasta e o agregado, tendo tamanho variado. Entretanto, devido

ao espaço propiciado para o crescimento nessa zona, ali são encontrados cristais de hidróxido de cálcio de grandes dimensões.

Os valores do módulo de elasticidade da portlandita foram estudados por Monteiro e Chang (1995) e Manzano, Dolado e Ayuela (2009), sendo atribuído, respectivamente, os valores de 42,2 GPa e 35,4 GPa. Ainda, Hu e Li (2014) obtiveram o valor de 37,2 GPa em pasta preparada com cimento Portland tipo I (ASTM C150) e relação água/cimento de 0,40.

O volume de sólidos correspondente de hidróxido de cálcio é de aproximadamente 25% em relação ao volume de pasta (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A principal função desse composto é a manutenção da estabilidade química das ligações do C-S-H, em função de um pH altamente básico aos compostos cimentícios (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Bullard *et al.* (2011) destacam que no cimento Portland a outra fase que afeta a hidratação, principalmente em períodos muito curtos, é o C_3A e, caso estiver na ausência de sulfato de cálcio, a reação é imediata. Taylor (1997) e Mehta e Monteiro (2014) descrevem que a reação existente entre o aluminato tricálcico (C_3A) e o sulfato de cálcio (gesso) ocasiona a formação de sulfoaluminato de cálcio, denominada de etringita (AFt), representando aproximadamente 15% do volume de sólidos da pasta hidratada.

Há de se considerar, também, a presença de grãos de cimento ou de adições minerais que não foram hidratados, ou não tiveram participação na reação. No caso dos grãos de cimento o processo de hidratação é progressivo desde que haja água disponível. Os grãos anidros serão hidratados com o passar do tempo. Scrivener e Nonat (2011) citam que aos 28 dias de idade o grau de hidratação é de aproximadamente 80%, sendo que a maior parte do C_2S ainda não hidratou.

Sideris, Manita e Sideris (2004) destacam que o módulo de elasticidade do concreto e da argamassa é estabilizado somente com o final da hidratação da pasta de cimento, o que se dá após os 28 dias.

Há ocorrência de poros e vazios na pasta de cimento hidratado, seja pela incorporação de ar durante o amassamento, pela exsudação da água livre presente na mistura e pelos vazios entre os filamentos dos cristais gerados.

Quanto maior a quantidade de vazios, menor a rigidez e a resistência e maior a permeabilidade da pasta.

Alguns estudos foram conduzidos afim de verificar a rigidez da pasta de cimento. Yang e Huang (1996) verificaram que a pasta de cimento hidratada ($a/c = 0,50$) tem um módulo de elasticidade de 12 GPa. Já para Lutz, Monteiro e Zimmerman (1997) a pasta apresentou um módulo de 30,1 GPa ($a/c = 0,40$). Hashin e Monteiro (2002) encontraram o valor de 22,5 GPa.

A determinação das características elásticas dos compostos citados anteriormente, parte do uso de técnicas experimentais, tais como, a Microscopia de Sonda de Varredura (SPM), Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia Dispersiva de Energia (SEM/EDS), Microscopia de Tunelamento (STM) e Espectroscopia de Brillouin; ou por meio da combinação dessas com equações da Teoria do Funcional da Densidade (DFT) e Modelos Micromecânicos (Reuss, Voigt, entre outros).

A Tabela 7 apresenta a proporção de cada composto formado na hidratação e o valor aproximado do módulo de elasticidade.

Tabela 7 - Distribuição volumétrica e módulo de elasticidade dos compostos
(Adaptado de Montija, 2007)

| Componente | Volume de sólidos na pasta (%) | Volume na pasta (%) | Volume no concreto (%) | Módulo de elasticidade (GPa) |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|
| C-S-H | 50 - 60 | 40 - 55 | 10 - 25 | 20 - 40 |
| CH | 20 - 25 | | | 40 |
| Af_v/Af_m | 15 - 20 | | | 20 - 40 |
| Grão anidro de cimento | ⁽¹⁾ | 10 - 15 | 3 - 6 | 120 |
| Poros no Gel | - | 3 - 4 ⁽²⁾ | 1 - 2 ⁽²⁾ | 0 |
| Poros Capilares | - | 25 - 35 ⁽³⁾ | 8 - 13 ⁽³⁾ | 0 |
| Poros do ar aprisionado | - | 5 - 6 | 1 - 5 | 0 |
| Pasta | - | 100 | 30 - 40 | 7 - 28 |
| Zona de Transição | - | - | ⁽⁴⁾ | 4 - 14 |
| Agregados | - | - | 60 - 70 | 40 - 100 |
| Concreto | - | - | 100 | 20 - 40 |

(1) depende do grau de hidratação, há redução com o tempo;

(2) numericamente corresponde a 25,4% do volume de água quimicamente combinada no gel de C-S-H;

(3) aproximadamente igual ao volume de sólidos da pasta somado aos poros provenientes da exsudação;

(4) depende do grau de hidratação da pasta. Quimicamente o valor diminui com a idade, entretanto a zona de transição não se anula com o tempo, porque sempre há microfissuração.

Com base nos dados apresentados por Montija (2007) é possível verificar que os compostos oriundos da hidratação têm comportamento distintos para a definição da rigidez. À medida em que são alteradas as proporções de cimento Portland e água, a rigidez da pasta e da zona de transição também são alteradas.

Vieira (2008) acusa que o módulo de elasticidade dos concretos evolui com a idade de hidratação. Os cimentos de alta resistência inicial (CP V ARI e CP V ARI RS) apresentam valor de módulo próximo a duas vezes, em média, em relação aos outros tipos de cimento (CP II, CP IV) nas idades iniciais. Ainda, a autora destaca que à medida em que a hidratação se desenvolve há redução nas diferenças, sendo isso visualizado já aos 28 dias de idade.

Quanto ao uso de escória de alto forno na composição, Özbay, Erdemir e Durmus (2016) afirmam que não há consenso sobre o efeito provocado pelo uso dessa, em substituição e/ou adição sobre o cimento Portland. Na maioria dos casos os valores de módulo de deformação do concreto são iguais ou ligeiramente superiores, em idades maiores que 28 dias de idade.

A pasta por si só apresenta módulo de elasticidade inferior ao verificado nos agregados, influenciando, assim, o comportamento global da mistura.

2.3.1.2 Volume de pasta

A pasta constitui o elemento de união entre os grãos dos agregados. A eficácia dessa união depende diretamente das características mecânicas da pasta. As características físico-mecânicas da pasta são definidas pelo proporcionamento de seus constituintes, sendo determinante na definição de sua fluidez e, conseqüentemente, na fluidez do aglomerado produzido.

Numa pasta, água e ar são elementos de menor densidade, de maneira que o aumento desses elementos determina a redução da densidade da pasta e, conseqüentemente, de sua resistência mecânica. Portanto, é possível associar de forma direta a resistência mecânica da pasta de cimento Portland com sua densidade. Ao considerar um grupo definido de materiais, se um aglomerado de cimento Portland for bem dosado, de maneira que não haja vazios decorrentes de deficiências de proporcionamento entre agregados e pasta, a densidade do

aglomerado será função da densidade da pasta, ou seja, da relação água/cimento.

É possível afirmar que a resistência mecânica tem dependência direta com a quantidade de poros presente na pasta, pois à medida em que aumenta a quantidade de água, maior é o efeito oriundo da exsudação e da água livre, ocasionando a elevação da quantidade de poros e, conseqüentemente, redução na rigidez da pasta.

Isso é comprovado por Lutz, Monteiro e Zimmerman (1997), Bauer, Pereira e Leal (2012) e Xie *et al.* (2015) ao concluírem que há uma relação inversa entre relação água/cimento e o módulo de elasticidade, no mesmo sentido que a resistência à compressão, pois a pasta com maior relação água/cimento produz uma matriz cimentícia com maior porosidade, o que acarreta menor rigidez. Assim, ao ser mantida a mesma quantidade de cimento no sistema e variando a quantidade de água, os compostos resistentes (C-S-H; CH; AFt) não terão suas quantidades alteradas, pois a massa de cimento é a mesma, porém, a quantidade de água livre, responsável pela porosidade capilar, irá aumentar, reduzindo a rigidez do concreto.

Prado (2006) e Barbosa, Yanez e Carneiro (2011) salientam que há uma forte dependência entre o módulo de elasticidade do concreto e a pasta de cimento, destacando que a influência da fase pasta está diretamente interligada ao tempo de hidratação e à resistência à compressão.

Vale ressaltar que à medida em que o volume de pasta cresce na proporção da mistura, a quantidade de agregado reduz, o que novamente provoca aumento da deformabilidade do compósito. Melo Neto e Helene (2002) destacam em seu estudo que os valores de módulo de deformação do concreto têm ampla variação para uma mesma relação água/cimento de acordo com os parâmetros de dosagem e, principalmente, devido à proporção de agregado graúdo.

Isso é fortemente destacado por Montija (2007) ao salientar que a rigidez do sistema é dependente da interação entre as fases, tanto do agregado quanto da pasta. O aumento do consumo de cimento Portland na mistura para uma dada

consistência, implicará na redução do módulo de deformação, mesmo não havendo redução na resistência à compressão.

A Figura 33 apresenta os resultados de dois diferentes estudos desenvolvidos com três (03) traços distintos, fixando o abatimento pelo tronco de cone. A consistência desejada foi obtida somente pela adição de água à mistura. Os estudos mostram que ao aumentar a proporção dos agregados é necessário elevar a demanda de água. Esse comportamento foi verificado por Melo Neto e Helene (2002), Viera (2008), Bauer, Pereira e Leal (2012).

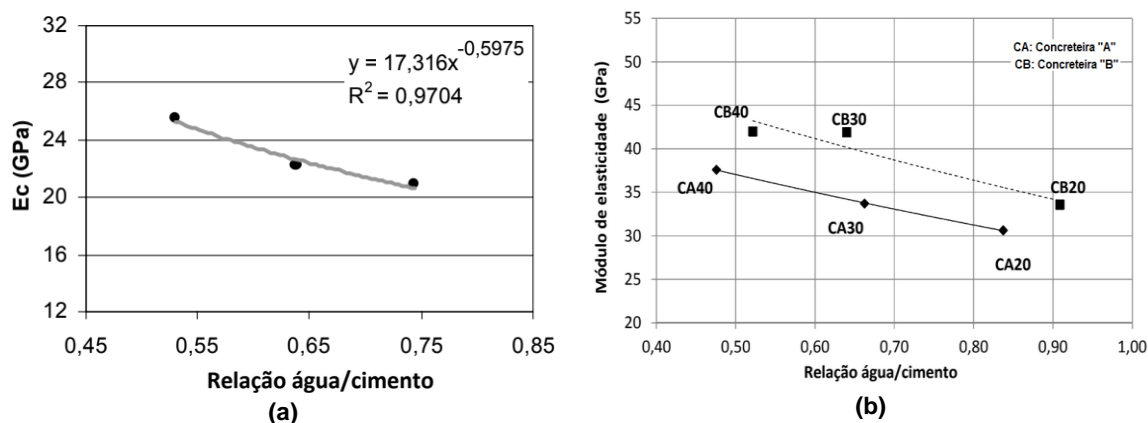


Figura 33 – Influência da relação a/c no módulo de elasticidade: (a) (Melo Neto e Helene, 2002); (b) (Bauer, Pereira e Leal, 2012)

O aumento do atrito interno da mistura exige maior afastamento entre os grãos do agregado para facilitar o movimento relativo entre as partículas. Esse afastamento é obtido pelo aumento do volume de pasta, o que pode ser obtido pelo aumento de água; ar incorporado; água, cimento e ar incorporado; ou apenas cimento quando for ultrapassado o limite da coesão. Dessa forma, o aumento da relação a/c resulta em maior porosidade da pasta, ocasionando a redução no valor do módulo.

Melo Neto e Helene (2002) verificaram que ao fixar a relação água/cimento (resistência à compressão) para diferentes abatimentos (60, 90 e 220 mm), o consumo de cimento Portland aumenta. Dessa forma, à medida em que aumenta o consumo de cimento ocorre a redução no valor do módulo (Figura 34a). Isso é propiciado pela elevação do volume de pasta e redução no volume de agregado na mistura.

Por outro lado, Melo Neto e Helene (2002), ao considerarem fixos o abatimento pelo tronco de cone e o teor de água sobre materiais secos (H%), verificam que ocorre a redução da relação água/cimento, provocando o aumento no consumo de cimento Portland, conduzindo a maiores valores de módulo de deformação, devido à elevação da resistência e da rigidez da pasta hidratada (Figura 34b).

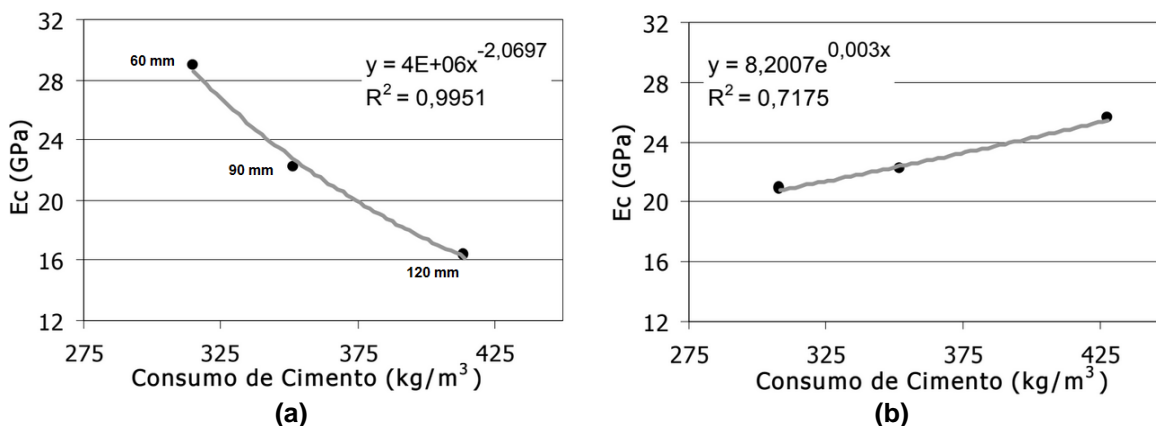


Figura 34 – Influência do consumo de cimento no módulo de elasticidade: (a) relação a/c constante; (b) abatimento constante (Melo Neto e Helene, 2002)

O mesmo fato é registrado por Cunha *et al.* (2006) e Bauer, Pereira e Leal (2012), ao observarem que ao fixar o abatimento, o consumo de cimento por metro cúbico aumenta para relações água/cimento menores, ocasionando o acréscimo nos valores de módulo, devido ao fortalecimento da matriz cimentícia. A Figura 35 apresenta o efeito do consumo de cimento Portland sobre o módulo de elasticidade.

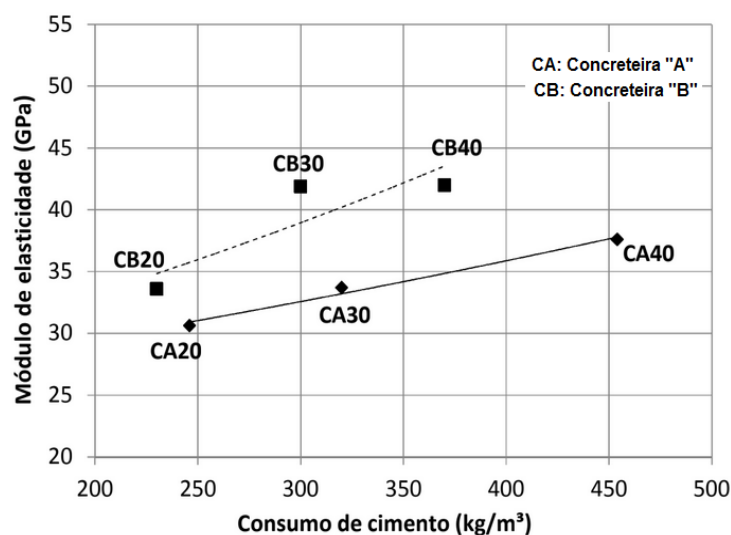


Figura 35 – Influência no módulo elasticidade: consumo de cimento com abatimento constante (Bauer, Pereira e Leal, 2012)

De Marchi *et al.* (2010) identificaram que ao ser elevado o abatimento pelo tronco de cone somente com a adição de água, ocorre o aumento no consumo de cimento Portland e do volume de pasta, conduzindo à redução do módulo. Esse comportamento foi verificado para dois (02) diferentes agregados graúdos, basalto e granito, bem como em três (03) níveis de resistência característica à compressão. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 - Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade com agregado de basalto (Adaptado de De Marchi *et al.*, 2010)

| f_{ck} (MPa) | $f_{c,28}$ (MPa) | $E_{cs,28}$ (GPa) | a/c | Abatimento pelo tronco de cone (mm) | m (kg) | Consumo de cimento (kg/m ³) | Volume de pasta (l/m ³) |
|----------------|------------------|-------------------|-------|-------------------------------------|--------|---|-------------------------------------|
| 30 | 40,8 | 34,3 | 0,591 | 85 | 6,7 | 308 | 285 |
| | 39,7 | 33,3 | 0,594 | 130 | 6,2 | 325 | 301 |
| | 39,4 | 32,5 | 0,585 | 165 | 5,9 | 337 | 309 |
| 35 | 48,7 | 36,7 | 0,492 | 85 | 5,4 | 370 | 305 |
| | 48,2 | 35,3 | 0,490 | 120 | 5,0 | 390 | 321 |
| | 45,8 | 34,6 | 0,513 | 160 | 4,8 | 400 | 338 |
| 40 | 53,8 | 37,2 | 0,440 | 80 | 4,8 | 411 | 318 |
| | 52,4 | 36,4 | 0,434 | 120 | 4,4 | 433 | 332 |
| | 50,2 | 35,2 | 0,468 | 160 | 4,2 | 449 | 360 |

Tabela 9 - Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade com agregado de granito (Adaptado de De Marchi *et al.*, 2010)

| f_{ck} (MPa) | $f_{c,28}$ (MPa) | $E_{cs,28}$ (GPa) | a/c | Abatimento pelo tronco de cone (mm) | m (kg) | Consumo de cimento (kg/m ³) | Volume de pasta (l/m ³) |
|----------------|------------------|-------------------|-------|-------------------------------------|--------|---|-------------------------------------|
| 30 | 37,3 | 26,8 | 0,575 | 80 | 6,0 | 308 | 280 |
| | 37,7 | 24,9 | 0,590 | 125 | 5,7 | 317 | 293 |
| | 36,8 | 23,8 | 0,576 | 165 | 5,1 | 342 | 311 |
| 35 | 45,4 | 29,0 | 0,492 | 85 | 4,8 | 370 | 305 |
| | 44,7 | 27,1 | 0,500 | 125 | 4,6 | 380 | 317 |
| | 44,2 | 26,5 | 0,480 | 160 | 4,1 | 410 | 334 |
| 40 | 50,6 | 32,0 | 0,440 | 90 | 4,2 | 411 | 318 |
| | 49,5 | 29,9 | 0,462 | 130 | 4,1 | 422 | 336 |
| | 48,9 | 29,8 | 0,439 | 160 | 3,6 | 456 | 352 |

Rossignolo (2005) também constatou que o módulo de deformação reduz, à medida que o volume de pasta aumenta. Nota-se, através das Tabela 8 e 9, que à medida em que o volume de pasta aumenta, a proporção de agregado na mistura é reduzida, acompanhando assim a redução do módulo. Dessa forma é possível inferir que o aumento no consumo de cimento Portland não garante a elevação do

valor do módulo, e sim, a manutenção da resistência à compressão com maior abatimento pelo tronco de cone.

Nesse sentido, Cabral, Monteiro e Helene (2014) verificaram que, ao fixar a relação água/cimento e alterando as proporções de materiais por metro cúbico, afim de reduzir o abatimento pelo tronco de cone, o concreto mantém a resistência à compressão, obtendo assim o mesmo comportamento de De Marchi *et al.* (2010), porém o valor do módulo é alterado.

Melo Neto e Helene (2002), Silva, Brito e Dhir (2016), Del Bosque *et al.* (2017) e Davraz *et al.* (2018) constataram que para relações água/cimento iguais e com diferentes tipos e proporções entre os demais constituintes, é possível atingir valores de resistência à compressão iguais ou similares, porém valores de módulo de deformação distintos.

Assim, os modelos teóricos de previsão representam um grande risco, pois na maior parte dos casos levam em consideração apenas a resistência à compressão.

Vasconcelos e Giammusso (1998) e Vieira (2008) destacam que a resistência à compressão e o módulo do concreto não são influenciados no mesmo grau, ou seja, o aumento do valor do módulo não é proporcional ao da resistência à compressão do concreto.

Guimarães e Santos (1999) corroboram em seu estudo salientando que à medida em que a resistência à compressão aumenta, o módulo de deformação não sofre acréscimos importantes (Figura 36).

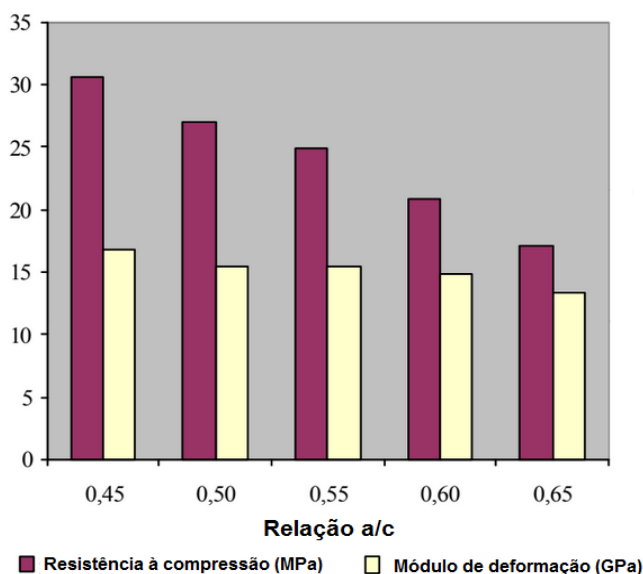


Figura 36 – Influência da resistência à compressão no módulo de deformação
(Adaptado de Guimarães e Santos, 1999)

Através da Figura 36 é possível verificar que quando a resistência à compressão aumenta, há redução da relação água/cimento. Essa variação é acompanhada pela elevação do volume de pasta, o que aumenta a quantidade de material com maior deformação, embora a resistência à compressão seja superior. Esse comportamento já foi destacado por Mehta e Monteiro (2014).

Leal (2012) verificou em duas centrais fornecedoras (A e B) traços para diferentes resistências à compressão (C20, C30, C40), considerando a mesma consistência e agregados de origem calcária, porém com relações a/c diferentes. O estudo apontou que os concretos apresentaram valores distintos de módulo de elasticidade, obtendo maior amplitude de variação o concreto com resistência de 30 MPa. O valor de módulo apresentado pela “Fornecedora A” foi de 33 GPa e, de 42 GPa, para a “Fornecedora B”. Os resultados apresentados pelo autor permitem associar o fato ao volume de pasta utilizado, já que a “Fornecedora B”, para todas as classes de resistência, utilizou menor volume de pasta.

Talvez, a melhor explicação seja dada por Li *et al.* (1999) ao destacarem que a maneira mais eficiente de reduzir as deformações do concreto e elevar a sua rigidez é aumentar o módulo de elasticidade da pasta. Djanikian Filho (2010), Leal (2012) e Arruda (2013) citam que a maneira mais prática de aumentar a rigidez da pasta, é através da redução da relação a/c e elevação consumo de cimento na mistura.

Dessa forma, é possível supor que o módulo de deformação tem relação direta com a porosidade do concreto. Assim, ao reduzir a relação água/cimento e aumentar o consumo de cimento é possível reduzir a porosidade da matriz cimentícia e favorecer a rigidez do sistema. Entretanto, nenhum estudo mostra a relação existente entre a substituição parcial de cimento Portland por uma adição mineral, a fim de manter o mesmo volume de pasta.

2.3.2 O agregado

Os agregados miúdo e graúdo são responsáveis pelo esqueleto granular a ser preenchido pela pasta. Para Al-Oraimi, Taha e Hassan (2006), Ghebrab e Soroushian (2011), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014) os agregados que constituem o concreto ocupam geralmente um volume correspondente de 75 a 80% da mistura.

Convém citar que o emprego de agregados em aglomerados de cimento Portland têm por finalidade a redução do custo, como objetivo econômico e de fundamental importância, além da estabilização do volume da mistura com implicação no comportamento frente ao processo de retração e do aumento da sua rigidez, pela redução da deformabilidade do material. De Marchi (2011) destaca que o concreto é composto de um material mais rígido - agregado e outro, a pasta, mais poroso e menos rígido, sendo esperado na mistura um módulo de deformação de valor intermediário.

Por outro lado, a proporção entre agregado graúdo e miúdo é definida pelo teor de argamassa (α %). O aumento do teor de argamassa implica no aumento da quantidade de areia na mistura com redução do teor de agregado graúdo, em um mesmo traço. Sbrighi Neto (2005) destaca que o aumento na trabalhabilidade está vinculado à elevação do teor de argamassa e com redução na quantidade de agregado graúdo, tornando mais deformável o material.

Gujel, Kazmierczak e Masuero (2017) destacam que o valor do módulo é dependente do teor de agregado e de argamassa. Sbrighi Neto (2005) explica que a utilização de teores de argamassa elevados leva à produção de concretos com valores menores de módulo de elasticidade, pois reduz a quantidade de agregado graúdo. O teor de argamassa eleva a superfície específica, aumentando a

demanda de água e de cimento para a manutenção da relação água/cimento e, indiretamente, aumenta o volume de pasta.

O estudo conduzido por Leal (2012) verificou que o aumento do teor de argamassa na constituição do concreto propicia a redução no módulo de elasticidade (Figura 37). Entretanto, o estudo conduzido pelo autor não manteve as mesmas características de resistência à compressão, ou seja, há uma sobreposição nos efeitos das variáveis que influenciam o valor do módulo. Dentro da ótica de dosagem do concreto, quanto maior a resistência à compressão, para uma mesma trabalhabilidade sem uso de aditivos, maior o volume de pasta e menor a quantidade de areia necessária, pois há o aumento da coesão da mistura.

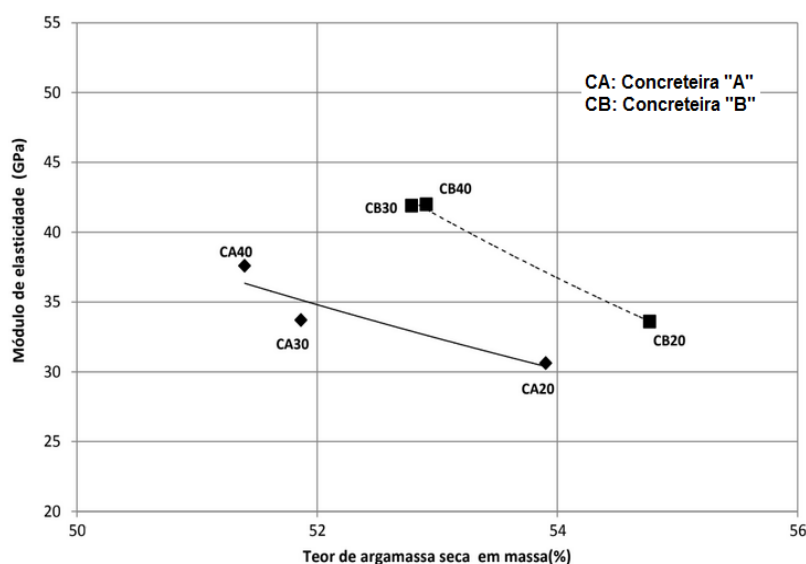


Figura 37 – Influência do teor de argamassa no módulo de elasticidade (Leal, 2012)

Já em relação ao agregado graúdo, Melo Neto e Helene (2002) destacam que o módulo de deformação varia a partir de 35 GPa, enquanto que a pasta de cimento Portland varia a partir de 16 GPa. O esperado é que o concreto possa apresentar módulo de deformação compreendido entre esses dois valores, dependendo da composição da sua mistura.

Alhadas (2008) e Mehta e Monteiro (2014) relatam que a influência real do agregado graúdo só é percebida em idades superiores, pois inicialmente a pasta de cimento hidratada exercerá grande influência na restrição das deformações, pois é a mais deformável do sistema e, com o passar do tempo, desenvolve

resistência elevada, permitindo assim a transferência de esforços ao agregado graúdo.

Para Mehta e Monteiro (2014) e Tibbetts *et al.* (2018) o desempenho do agregado graúdo está diretamente ligado à sua densidade. Agregados naturais de baixa porosidade, tais como o basalto e granito, podem apresentar módulo de elasticidade na faixa de 70 a 140 GPa, enquanto que agregados de alta porosidade, como arenitos e calcários, situam-se na faixa de 21 a 49 GPa. O módulo de deformação do concreto produzido com agregados de alta porosidade varia entre 14 a 21 GPa, ou seja, equivale de 50 a 75% do módulo observado em concretos produzidos com agregados de baixa porosidade.

Furnas (1997), Barbosa e Geyer (2010), Borin, Falcão Bauer e Figueiredo (2012) destacam que o módulo de deformação do concreto aumenta conforme aumenta a resistência e o módulo da rocha originária do agregado graúdo, enrijecendo o concreto. Por outro lado, é possível inferir que à medida em que o volume de agregado graúdo aumenta na mistura, as características de deformabilidade se alteram (FURNAS, 1997; LI *et al.*, 1999; MYERS, 2008; ALHADAS, 2008; DE MARCHI *et al.*, 2010; BAUER, PEREIRA e LEAL, 2012; TIBBETTS *et al.*, 2018).

Na Figura 38 é possível verificar que o aumento do conteúdo de agregado graúdo na mistura reduz o valor do módulo de elasticidade na idade de 1 dia, por ser menor a quantidade de pasta hidratada e menor sua resistência, conforme já destacado por Alhadadas (2008) e Mehta e Monteiro (2014).

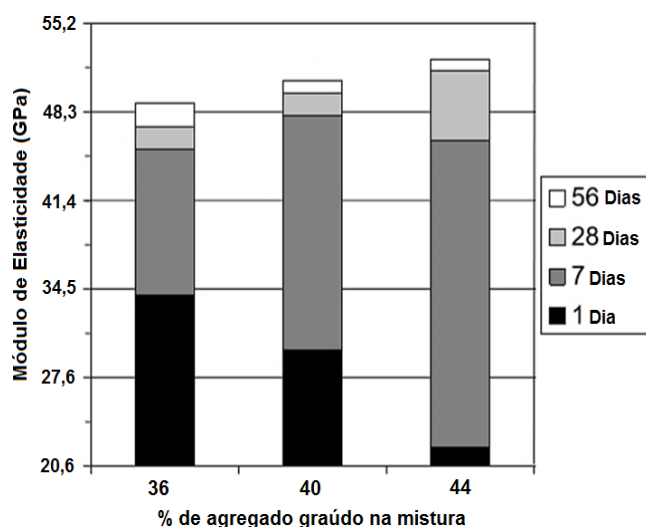


Figura 38 – Influência do teor de agregado graúdo no módulo de elasticidade (Adaptado de Myers, 2008)

O estudo conduzido por Myers (2008) constatou a influência do teor de agregado graúdo no desenvolvimento do módulo de elasticidade, concluindo que quanto maior o teor de agregado graúdo, maior o módulo de elasticidade final. Também, Vieira (2008) destaca que o aumento do módulo se dá com maior intensidade em idades mais avançadas.

Yang *et al.* (1995), utilizando quatro (04) diferentes agregados graúdos (aço, vidro, brita e pedregulho), constataram que para diferentes relações a/c, o módulo de elasticidade aumenta linearmente com o teor de agregado graúdo, independentemente do tipo. A Figura 39 ilustra os resultados obtidos no estudo.

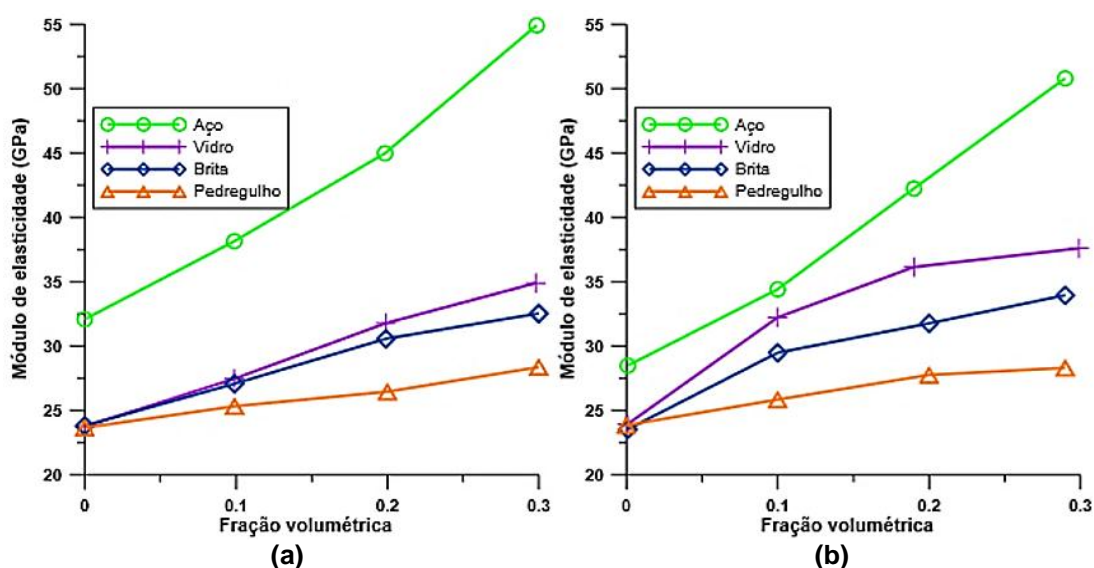


Figura 39 – Influência da fração volumétrica do agregado graúdo no módulo de elasticidade para relação a/c: (a) 0,286 e (b) 0,296 (Adaptado de Yang *et al.*, 1995)

Essa constatação também foi verificada em estudos com resíduos de construção e demolição (RCD), conduzidos por Silva (2011) e Benetti (2012), onde a quantidade utilizada, bem como os diferentes tipos de resíduos, exercem influência significativa sobre o valor do módulo.

Helene e Monteiro (1993) alertam que o aumento no teor de agregado pode ser prejudicado pela elevação da relação água/cimento em misturas com menor quantidade de aglomerante para a mesma consistência. Isso acarreta uma pasta mais porosa, menos resistente e mais deformável.

Com relação aos agregados é possível verificar sua influência direta no valor do módulo em função do volume ocupado no concreto e das características da rocha matriz (ALHADAS, 2008).

As variações do agregado podem exercer influência nas deformações do concreto. Li *et al.* (1999), Salman e Al-Amawee (2006), Vieira (2008), Pompeo Neto, Oliveira e Ramos (2011), Cui *et al.* (2012), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014), Gidrão (2015) e Campos *et al.* (2018) citam que a dimensão máxima característica, a composição granulométrica e mineralógica são propriedades importantes e podem influenciar a fissuração na zona de transição e a compacidade da estrutura granular, afetando a curva tensão-deformação, e conseqüentemente, o módulo.

2.3.2.1 Tipo de agregado graúdo

As diferentes rochas utilizadas para a preparação do concreto possuem características bem distintas, tanto de porosidade, quanto de resistência à compressão e de módulo de elasticidade. Essas características, segundo Araújo (2000), Kliszczewcz e Ajdukiewicz (2002), Sbrighi Neto (2005), Alhadas (2008), Cui *et al.* (2012), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014) e Beushausen e Dittmer (2015), Gidrão (2015), Bilesky (2016), Santos *et al.* (2017) e Tibbetts *et al.* (2018), influenciam diretamente o módulo de deformação ou elasticidade do concreto.

Rochas com módulo de elasticidade maior possuem maiores restrições a deformações, quando comparadas a rochas com valores inferiores. Com isso, as propriedades de rigidez do concreto são fortemente influenciadas pelo tipo de rocha utilizada. A Tabela 10 apresenta os principais tipos de rochas e os valores de módulo de elasticidade e resistência à compressão.

Tabela 10 - Módulo de elasticidade de rochas
(Elaborado com base em Falcão Bauer (1994), Frazão (2002) e Sbrighi Neto (2005))

| Rocha | Resistência à compressão (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|-----------|--------------------------------|------------------------------|
| Arenito | 50 – 150 | 20 – 40 |
| Basalto | 54 – 280 | 34 – 100 |
| Calcário | 90 – 200 | 30 – 79 |
| Diabásio | 140 – 250 | 90 – 130 |
| Gnaisse | 100 – 240 | 40 – 81 |
| Granito | 100 – 240 | 34 – 70 |
| Quartzito | 130 – 400 | 50 – 100 |
| Xisto | 100 – 180 | 25 – 40 |

A maior densidade do agregado determina sua resistência mecânica e rigidez, sendo assim fator determinante para o desempenho do concreto. A Figura 40 apresenta a influência no módulo de elasticidade do concreto causada por três (03) diferentes rochas e diversos níveis de resistência à compressão do concreto.

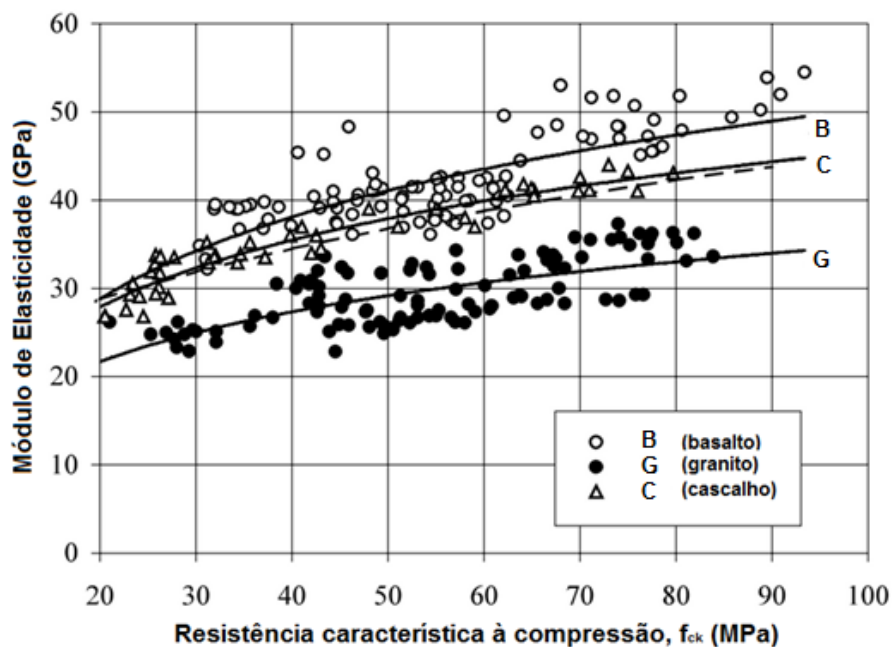


Figura 40 - Influência da rocha no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Kliszczewcz e Ajdukiewicz, 2002)

Ao ser fixado o nível de resistência à compressão do concreto em 30 MPa é possível obter um módulo de elasticidade de 25 GPa com granito, enquanto que com basalto esse valor ultrapassa os 30 GPa. O resultado desta relação para o agregado do tipo cascalho apresenta valor intermediário ao estudado com granito e basalto. Destaca-se que em resistências superiores a diferença cresce ainda mais, por exemplo, para 80 MPa, o módulo de elasticidade com basalto é próximo a 48 GPa e para o granito fica em torno de 33 GPa. Dessa forma fica nítida a influência que o agregado graúdo pode exercer diretamente no módulo de elasticidade para uma mesma resistência à compressão e mais acentuadamente com a evolução da hidratação da pasta de cimento Portland.

Silva (2003), ao estudar a influência de seixo rolado (sem identificação do tipo), calcário e basalto em concretos com um ano de idade, verificou que os valores de módulo de deformação são estatisticamente diferentes, para os mesmos níveis de resistência à compressão (Figura 41). O mesmo comportamento é verificado por Beushausen e Dittmer (2015) ao estudar a influência de dois (02) tipos de

agregado graúdo no módulo de elasticidade de CAD, sendo objeto do estudo as rochas de andesito e o granito, com módulos de elasticidade de 81 GPa e 58 GPa, respectivamente (Figura 42).

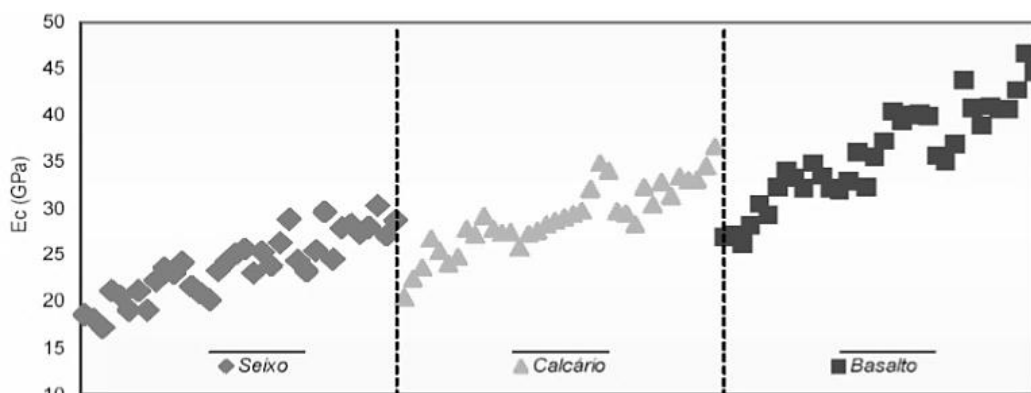


Figura 41 - Influência da rocha no módulo de deformação do concreto (Silva, 2003)

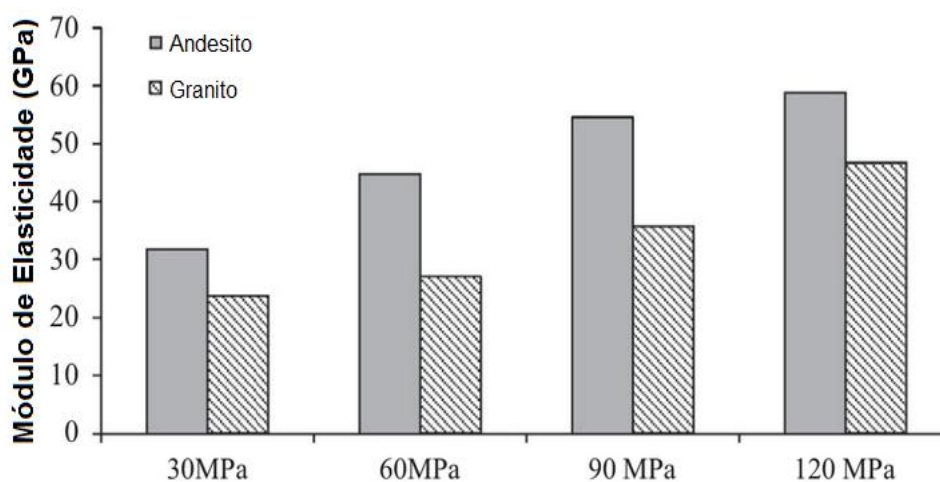


Figura 42 - Influência da rocha no módulo de elasticidade de CAD (Adaptado de Beushausen e Dittmer, 2015)

Myers (2008), comparando os diversos resultados experimentais de resistência à compressão e de módulo de elasticidade para quatro diferentes tipos de agregado - calcário dolomítico, seixo de rio, basalto e calcário calcítico, constatou as mesmas disparidades verificadas por Kliszczewcz e Ajdukiewicz (2002), concluindo que para diferentes rochas e mesma resistência à compressão do concreto, o módulo de elasticidade tem valor distinto. Cabe ressaltar que o autor constatou descolamento entre os valores estimados pelas equações empíricas da ACI 318 e ACI 363 e os obtidos experimentalmente (Figura 43).

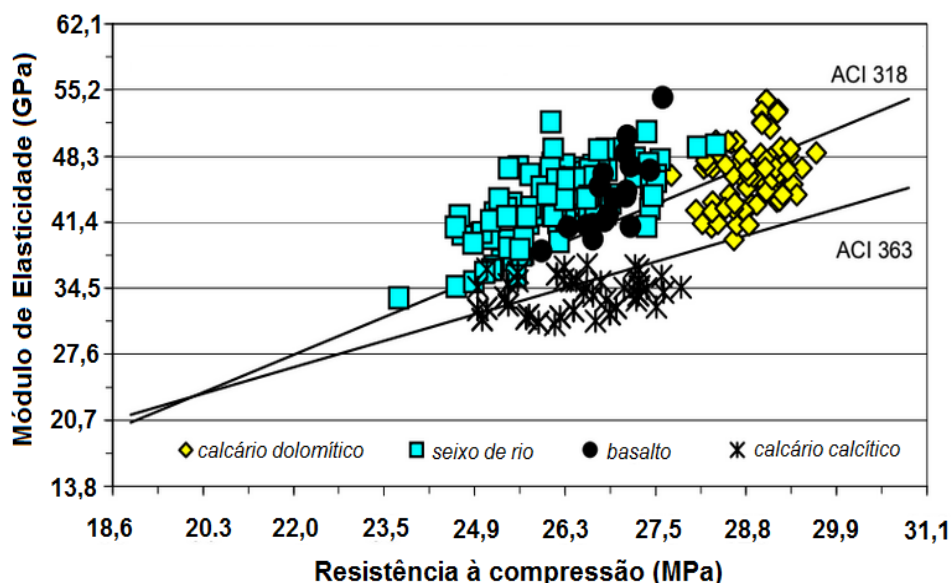


Figura 43 – Comparação experimental e empírica para o módulo de elasticidade (Adaptado de Myers, 2008)

O território brasileiro é vasto e a diversidade de rochas utilizadas na produção de agregados é o objetivo de diversos estudos, conduzidos de forma regionalizada. A principal variável de comparação, além das diferentes origens litológicas do agregado graúdo, é a resistência à compressão. Na Tabela 11 são destacados alguns dos principais estudos realizados.

Tabela 11 – Estudos regionalizados no Brasil

| Estudo | Região |
|----------------------|---|
| Costa e Prado (2001) | Região Metropolitana de Goiânia/GO |
| Nunes (2005) | Rio de Janeiro/RJ |
| Pacheco (2006) | Região Metropolitana de Vitória/ES |
| Alhadas (2008) | Belo Horizonte, Montes Claros, Passos, Guaxupé, Uberlândia, Patos de Minas/MG |
| Barbosa (2009) | Goiânia/GO |
| Rohden (2011) | Região Metropolitana de Porto Alegre/RS |
| Arruda (2013) | Triângulo Mineiro/MG |
| Bilesky (2016) | São Paulo/SP |

Costa e Prado (2001) fixaram a relação água/cimento e estudaram a influência do seixo rolado (sem identificação litológica), basalto e calcário utilizado na região

metropolitana de Goiânia/GO. O estudo constatou que os concretos preparados com agregado basáltico apresentam maior módulo de elasticidade em relação àqueles produzidos com britas de outra litologia, em todas as idades (7, 28, 91 e 413 dias). Já o seixo rolado possui o desempenho inferior a todos. O módulo de deformação cresce com o tempo para todos os tipos de agregados graúdos (Figura 44).

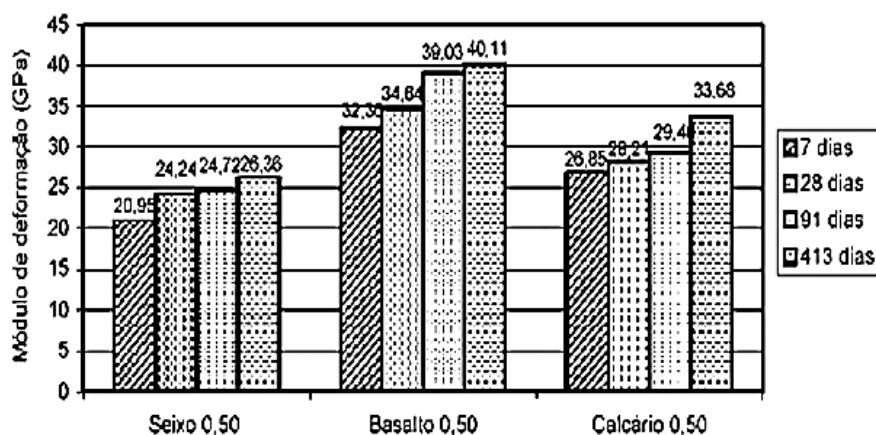


Figura 44 – Influência de agregados do Estado do Goiás/GO no módulo de deformação do concreto (Costa e Prado, 2001)

No Rio de Janeiro, Nunes (2005) estudou a influência do gnaisse e do sienito com módulos de elasticidade de 40 e 60 GPa, respectivamente, na resistência à compressão (25 e 30 MPa) e módulo de elasticidade do concreto. Ao final do estudo o autor constatou que os concretos preparados com sienito levam a valores de módulo de elasticidade superiores aos com gnaisse, entretanto, a diferença não é significativa (Figura 45).

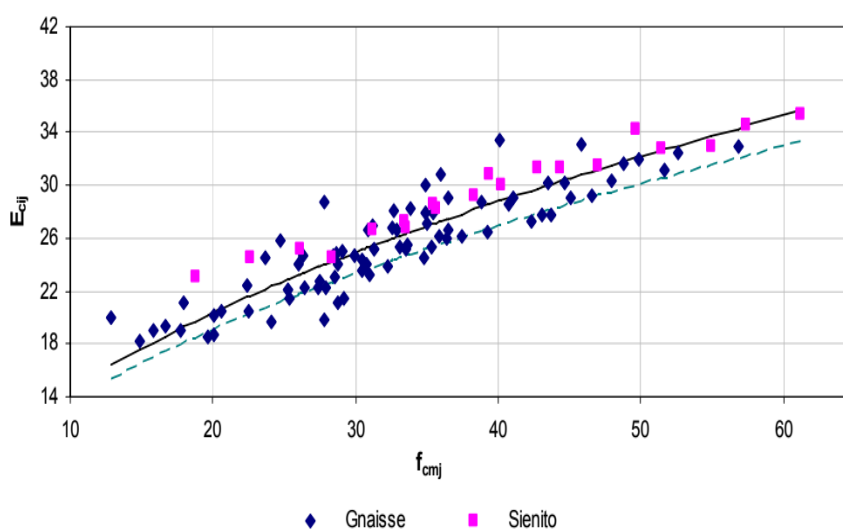


Figura 45 – Influência de agregado do Estado do Rio de Janeiro/RJ no módulo de elasticidade do concreto (Nunes, 2005)

Pacheco (2006) verificou a variação de duas (02) jazidas de exploração de diferentes granitos situadas na região metropolitana de Vitória/ES, abordando dois níveis de resistência à compressão (25 e 30 MPa) para quatro (04) centrais fornecedoras. A Figura 46 apresenta o comportamento para as diferentes centrais e as resistências à compressão.

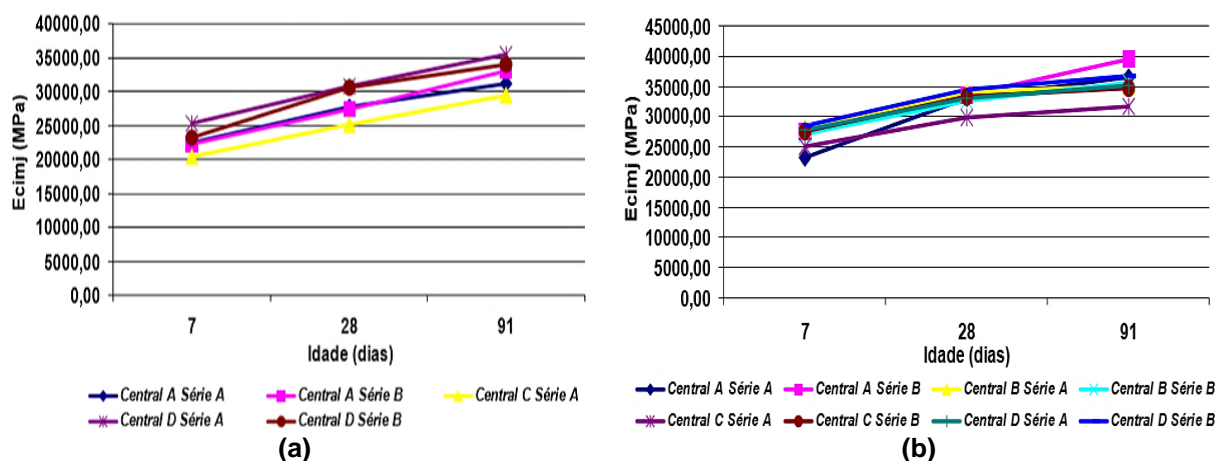


Figura 46 – Influência do granito proveniente de Vitória/ES no módulo de elasticidade do concreto: (a) $f_{ck} = 25$ MPa e (b) $f_{ck} = 30$ MPa (Pacheco, 2006)

É possível verificar que para o mesmo agregado graúdo (granito), o valor do módulo de elasticidade varia. Essas variações podem estar vinculadas às diferentes proporções utilizadas nos traços, pois o estudo não avaliou o agregado graúdo isoladamente. Dessa forma é possível induzir que centrais fornecedoras que trabalham com mesmo tipo de agregado, produzem concretos com resistência à compressão similar, porém com módulos distintos.

Alhadas (2008) estudou a influência de quatro diferentes agregados graúdos: basalto, dolomito, calcário e gnaiss. O estudo foi desenvolvido com a utilização de agregados provenientes de seis (06) cidades de Minas Gerais, conforme já destacado na Tabela 11. Os resultados do estudo indicam que os valores de módulo de deformação do concreto sofrem influência significativa, dependendo do tipo da rocha empregada na obtenção do agregado graúdo. A Figura 47 apresenta todos os resultados de módulo de deformação do estudo conduzido pelo autor, indicando que os valores mais elevados foram obtidos com agregados oriundos de basalto e dolomito.

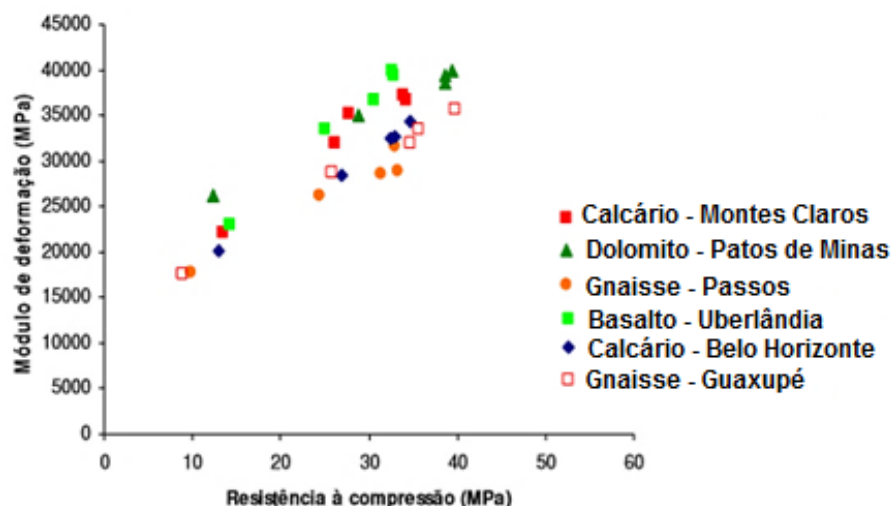


Figura 47 – Influência de agregados do Estado de Minas Gerais/MG no módulo de deformação do concreto (Adaptado de Alhadas, 2008)

Ainda no Estado de Goiás, Barbosa (2009) conduziu um estudo com a utilização de micaxisto, granulito e basalto. O estudo constatou que as diferenças no valor do módulo de elasticidade são significativas. Já o agregado graúdo que conduz ao maior valor de módulo de elasticidade é o produzido a partir de basalto, seguido pelo granulito. Esse comportamento é verificado para os três (03) níveis de resistência à compressão estudados (20, 30 e 40 MPa).

Rohden (2011) avaliou, em seu trabalho sobre CAD, a influência de diferentes rochas basálticas e graníticas, tanto na resistência à compressão, quanto no módulo de elasticidade do concreto. O autor verificou que o módulo de elasticidade do concreto está diretamente interligado à resistência à compressão da rocha (Figura 48).

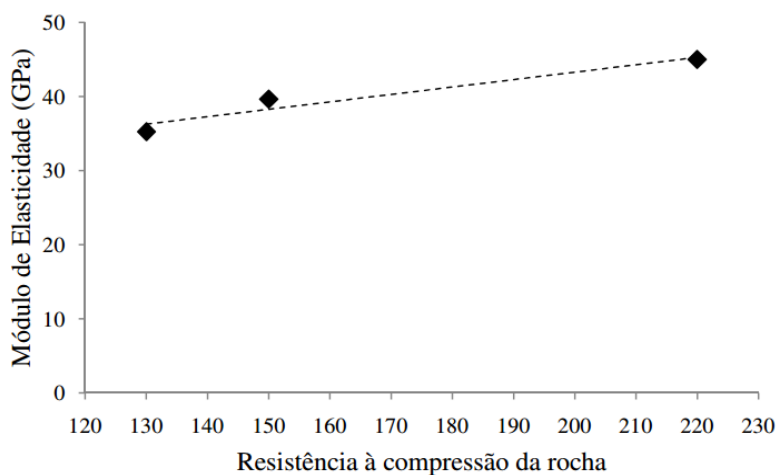


Figura 48 – Influência de agregados do Estado do Rio Grande do Sul/RS no módulo de elasticidade do concreto (Rohden, 2011)

O trabalho realizado por Arruda (2013), na região do Triângulo Mineiro/MG (Uberlândia, Patos de Minas e Uberaba), estuda a influência do basalto e do dolomito sobre o módulo para três (03) classes de resistência à compressão do concreto (C20, C30 e C40). O estudo concluiu que para uma mesma resistência à compressão, o basalto de Uberlândia/MG apresenta desempenho inferior ao do basalto de Uberaba/MG (Figura 49).

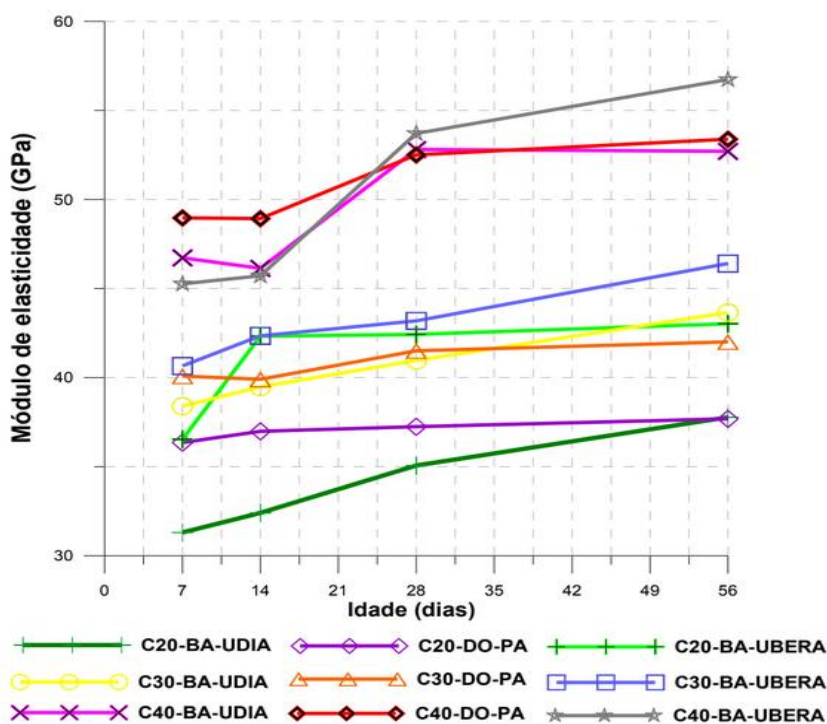


Figura 49 – Influência dos agregados do Triângulo Mineiro/MG no módulo de elasticidade do concreto (Arruda, 2013)

Onde:

- C20/C30/C40: classe de resistência à compressão;
- BA: basalto;
- DO: dolomito;
- UDIA: Uberlândia/MG;
- PA: Patos de Minas/MG;
- UBERA: Uberaba/MG.

Bilesky (2016) estudou a influência de três diferentes agregados graúdos utilizados em São Paulo/SP, sendo eles: o granito, diabásio e calcário. O autor constatou que os concretos preparados a partir de diabásio conduzem a valores de módulo de deformação superiores aos preparados com granito e calcário, para qualquer nível de resistência à compressão. A Figura 50 apresenta as relações obtida por Bilesky (2016) para cada tipo de agregado.

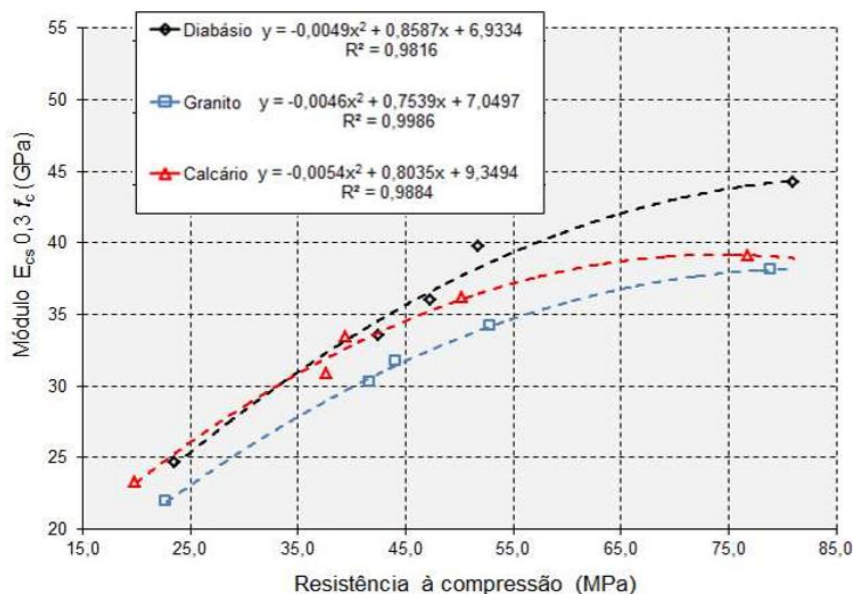


Figura 50 – Influência dos agregados do Estado de São Paulo/SP no módulo de deformação do concreto (Bilesky, 2016)

Gidrão (2015) afirma que os resultados de módulo obtidos com agregado de diabásio são iguais aos atingidos com agregado de arenito. Por outro lado, Schankoski *et al.* (2017), em seu estudo sobre diferentes origens de fíler, constataram que ao preencher a curva granulométrica com fíler de diabásio, há maior incremento no valor do módulo de deformação, quando comparado aos fíler de calcário e gnaise.

Estudo envolvendo Concreto Compactado com Rolo (CCR) foi realizado por Ribeiro e Almeida (2002) que estudaram a influência do tipo de rocha, fixando o consumo de cimento (90, 140 e 190 kg/m³), a consistência e utilizando agregados obtidos de três diferentes rochas: granito, xisto e calcário. No estudo, os autores concluíram que o módulo de elasticidade cresce juntamente com a resistência à compressão, sendo observada forte influência do tipo do agregado na deformação do concreto, onde o agregado de calcário é o que apresenta maior valor do módulo de elasticidade (Figura 51).

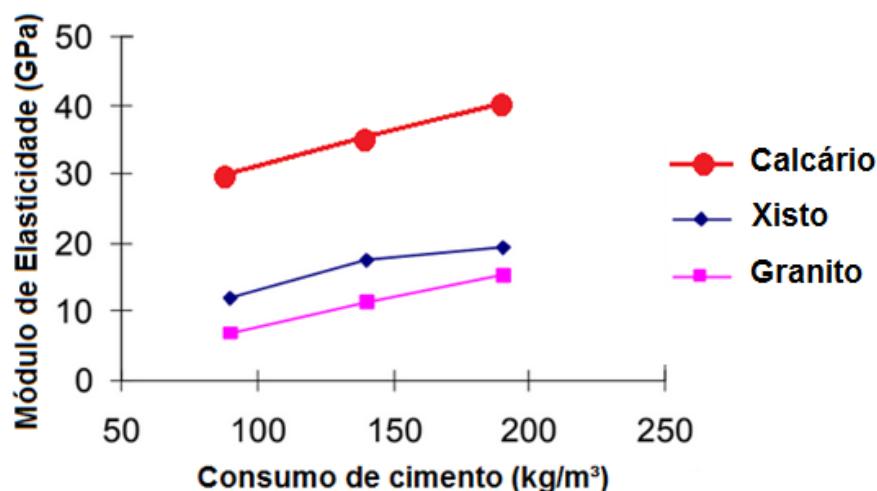


Figura 51 – Influência de diferentes tipos de agregados no módulo de elasticidade do CCR (Ribeiro e Almeida, 2002)

De acordo com a Figura 52, Yildirim e Ozkan (2011) verificam que concretos preparados com agregado calcário têm valores de módulo de elasticidade inferiores àqueles preparados com basalto, dolomito e quartzo, para a mesma relação água/cimento.

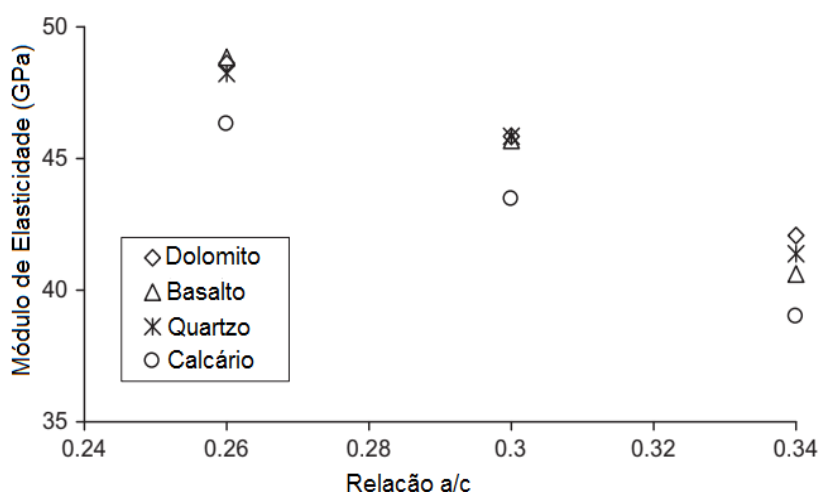


Figura 52 – Influência de diferentes tipos de agregados no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Yildirim e Ozkan, 2011)

Na avaliação global dos resultados, Santos *et al.* (2017) constataram em seu estudo que não há diferença significativa entre os valores de módulo dos concretos obtidos com basalto e dolomito.

Além dos agregados de densidade natural como citados anteriormente, ocorrem variações acerca do módulo de elasticidade dos concretos preparados com agregados leves. Nilsen, Monteiro e GjØrv (1995) citam que o módulo de elasticidade dos agregados leves varia entre 12,5 GPa e 19,6 GPa.

No estudo apresentado de forma simplificada por L`Hermitte (1970) é verificada a grande diferença obtida no módulo de elasticidade, quando comparados os agregados de densidade normal aos agregados leves (argila expandida). Os resultados informam que o concreto com agregado natural (sílico-calcário) apresenta um módulo de elasticidade 3,5 vezes superior ao preparado com argila expandida. Os estudos de Nilsen, Monteiro e GjØrv (1995), Li *et al.* (1999) e Cui *et al.* (2012) corroboram com este comportamento.

Quando utilizados agregados reciclados o comportamento é similar ao referente aos agregados leves. Os estudos de Xiao, Li e Zhang (2005) e Silva, Brito e Dhir (2016) mostram que há redução no módulo de elasticidade quando o volume de agregado natural é substituído por agregado reciclado de concreto (Figura 53).

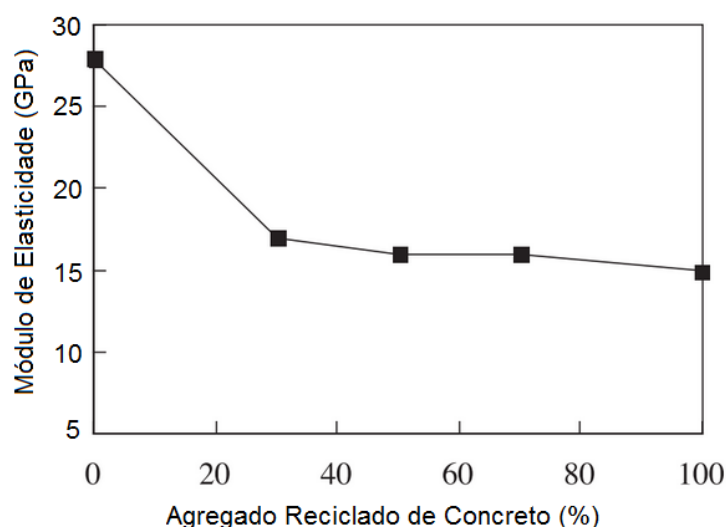


Figura 53 - Influência do teor de agregado reciclado no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Xian, Li e Zhang, 2005)

O estudo de Xiao, Li e Zhang (2005) constatou que há uma redução significativa do valor do módulo com a utilização de 30% de agregado reciclado de concreto. A redução chega a 45% no valor do módulo de elasticidade, quando é empregado apenas agregado reciclado.

Tang *et al.* (2016), Xuan *et al.* (2016), González *et al.* (2017) e Viana Neto, Sales e Sales (2018) observaram que a resistência à compressão é de mesma ordem de grandeza, porém, ocorrem reduções que variam entre 16% e 40% no valor do módulo do concreto, dependendo do teor de substituição de agregado normal por reciclado.

Corroboram, Frotté *et al.* (2017), González *et al.* (2017) e Estolano *et al.* (2018) que constataram que o decréscimo no valor do módulo é linear à medida em que o volume de agregado natural é substituído por agregado reciclado. Ainda, Estolano *et al.* (2018) destacam que o módulo é muito sensível, sendo tão afetado quanto a absorção de água e a massa específica.

Ainda, Frotté *et al.* (2017) destacam que há tendência de elevação do módulo com o aumento da resistência à compressão, porém a análise apresenta baixa correlação. Já o comportamento visualizado por González *et al.* (2017) é similar, contudo há forte correlação (linear) entre os valores de resistência à compressão e de módulo de elasticidade dos concretos preparados com agregado reciclado.

A redução observada no valor do módulo do concreto é devida à substituição de um agregado mais rígido, natural, por outro com menor rigidez, agregado reciclado de concreto e/ou cerâmico, ocasionando conseqüentemente a redução da densidade do concreto no estado endurecido.

Na substituição de agregado miúdo natural por reciclado não são acusadas diferenças significativas no valor de módulo aos 28 dias, embora outras propriedades sejam afetadas (CAMPOS *et al.*, 2018). Martins, Marcoantonio e Lenine (2018), ao utilizarem plástico como substituto do agregado miúdo, verificaram que há redução no valor módulo, ao compararem ao concreto de referência.

2.3.2.2 Composição granulométrica

Diante do exposto no item anterior, o tipo e o volume do agregado graúdo estão diretamente ligados ao valor do módulo. Entretanto, o arranjo do esqueleto granular também exercerá influência, uma vez que os vazios deixados pelo agregado devem ser ocupados por argamassa. Alterações na distribuição granulométrica do agregado graúdo podem interferir no teor de argamassa, havendo impacto sobre as características finais do concreto.

Montija (2007) destaca que a composição granulométrica do esqueleto granular pode gerar uma menor porosidade da estrutura, que será preenchida com a menor quantidade de pasta de cimento, tornando o compósito mais rígido. Nesse sentido, quanto maior a quantidade de grãos de agregado mais resistentes e

menos deformáveis for possível colocar num compósito, maior a quantidade de pontos de contato e transferência de esforços, resultando num menor volume de pasta a ser utilizado para preencher a estrutura assim estabelecida.

Lenz (2016), Farias, Palmeiras e Beja (2017) citam que tanto a distribuição granulométrica, quanto a morfologia dos grãos influenciam no empacotamento e na densidade da mistura. Uma curva granulométrica contínua, bem graduada, conduz a um menor volume de vazios. Quando um agregado não apresenta granulometria contínua é necessária a realização de mistura com outro agregado de mesma tipologia. Recena (2011) registra um procedimento de proporcionamento entre agregados, que visa obter a maior massa unitária, ou seja, o menor volume de vazios.

O procedimento desenvolvido por Recena (2011) vai ao encontro do conceito fixado por Silva *et al.* (2008) e De Larrard (2009) no qual salientam que um agregado apresenta granulometria bem distribuída, caso haja uma alta amplitude de tamanho de grãos presente no agregado.

O estudo desenvolvido por Da Silva e Campiteli (2008) verificou que o módulo de elasticidade para argamassa foi maior para as amostras reproduzidas com o auxílio de areia artificial. Os autores atrelam os resultados à presença de grande quantidade de material fino passante na peneira 75 μ m, associando assim o efeito fíler.

Lenz (2016) acusou o aumento do módulo de elasticidade ao utilizar uma composição entre dois agregados graúdos (Brita "0" + Brita "1") e uma areia artificial, justificando esse fato a maior quantidade de agregado presente no concreto, através da otimização do empacotamento da mistura, aumentando o travamento entre os grãos. O contrário foi constatado no estudo de Pompeo Neto, Oliveira e Ramos (2011), no qual são considerados dois teores de argamassa, denominados baixo e alto, respectivamente 50% e 56%, em massa. Diante dos resultados apresentados, mantendo-se fixo o traço em massa, a relação água/cimento e o teor de sílica ativa adicionado à mistura, não foi constatada influência significativa no módulo de deformação do concreto.

Outro fator vinculado ao desempenho do concreto com relação ao valor do módulo é a dimensão máxima característica do agregado. Entretanto, esta propriedade sempre influenciará em menor ou maior consumo de água na mistura, em função da superfície específica. Porém, é necessário frisar a possibilidade de utilizar aditivos redutores de água.

Kummer (2016) avaliou dois tamanhos máximos de grãos frente ao desempenho do módulo de elasticidade. O autor verificou que quando utilizado um agregado com dimensão máxima 19 mm o valor do módulo é superior em 4,5 % em comparação àquele obtido com emprego de agregado de dimensão máxima 12,5mm. O mesmo comportamento já havia sido encontrado por Li *et al.* (1999), Barbosa (1999), Abo-Qudais (2005), Gagliardo, Vidal e Gagliardo (2010) e Yildirim e Ozkan (2011).

Complementando, Gidrão (2015) e Kummer (2016) verificaram que essas diferenças persistem em diferentes níveis de resistência à compressão. O efeito da dimensão máxima característica do agregado sobre o valor do módulo é representado pelas Figuras 54 e 55.

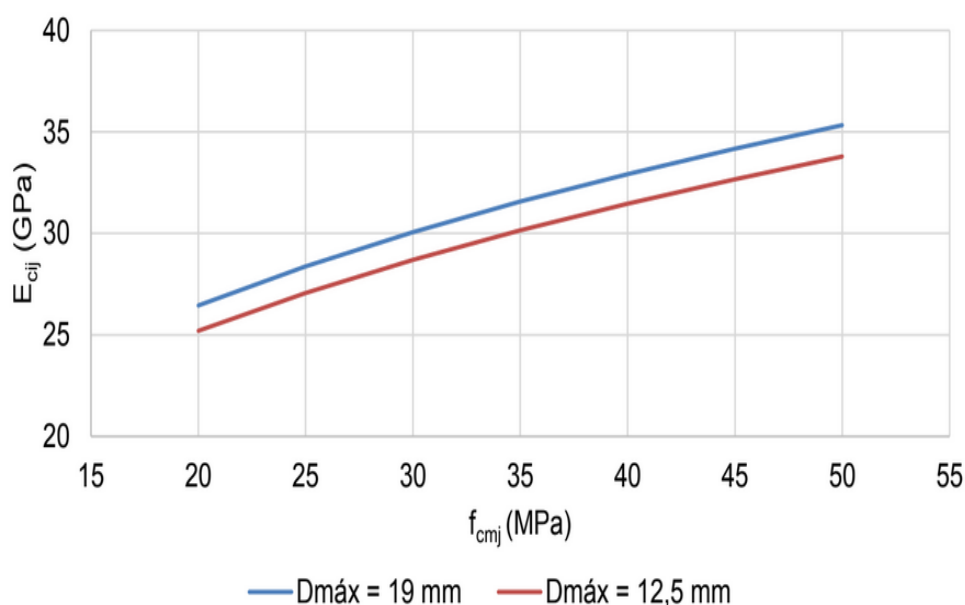


Figura 54 – Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Kummer, 2016)

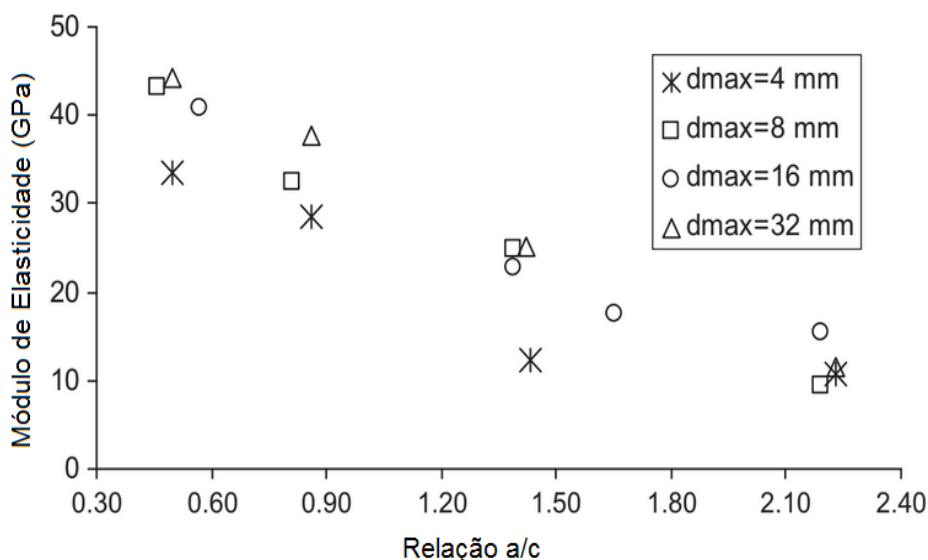


Figura 55 – Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Yildirim e Ozkan, 2011)

Li *et al.* (1999) constataram que embora a dimensão máxima característica seja igual para duas diferentes distribuições granulométricas, o valor do módulo é alterado por essa modificação. Dessa forma, os autores concluíram que curvas granulométricas com maior continuidade e maior dimensão máxima característica elevam o valor do módulo (Figura 56).

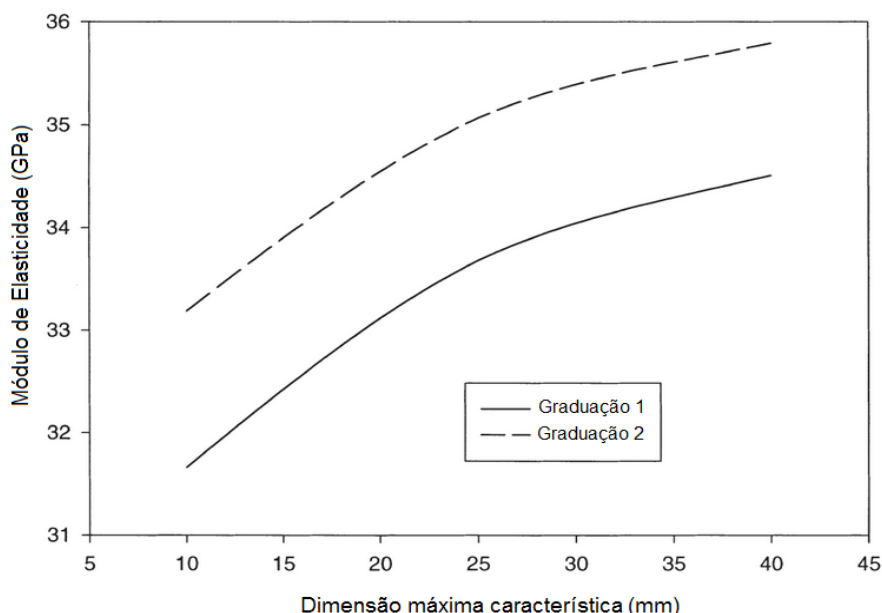


Figura 56 – Influência da distribuição granulométrica e dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Li *et al.*, 1999)

Em contrapartida, analisando a influência da dimensão máxima do agregado, Rohden (2011) concluiu que não há variação nos valores de módulo de deformação com o aumento da dimensão máxima característica (Figura 57).

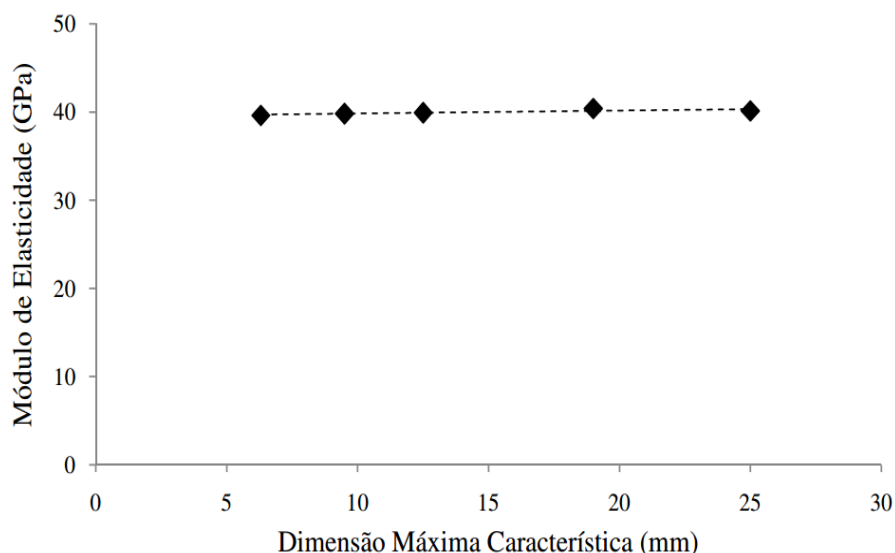


Figura 57 – Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Rohden, 2011)

Corroborando, Pereira Neto e Djanikian (1995) citam que a dimensão máxima característica não garante a elevação do módulo de elasticidade, ao ser usado um agregado com dimensão de 19 mm ou 25 mm. Entretanto, quando alterado o tipo da rocha, a influência no valor do módulo de elasticidade é maior. Os resultados do estudo estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Influência da dimensão máxima no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Pereira Neto e Djanikian, 1995)

| Tipo de Rocha | Idade (dias) | Módulo de Elasticidade (GPa) | | |
|---------------|--------------|--------------------------------|-------|-------|
| | | Dimensão Máxima Característica | | |
| | | 9,5 mm | 19 mm | 25 mm |
| Granito | 14 | 31,9 | 31,4 | 31,2 |
| Gnaisse | | 32,2 | 33,7 | - |
| Basalto | | 39,2 | 39,1 | 38,5 |
| Diabásio | | 32,6 | 36,0 | 38,4 |
| Calcário | | - | 37,5 | 38,4 |
| Granito | 28 | 31,8 | 33,2 | 32,9 |
| Gnaisse | | 34,6 | 35,5 | 39,1 |
| Basalto | | 40,9 | 40,1 | 42,8 |
| Diabásio | | 35,4 | 37,5 | 39,3 |
| Calcário | | - | 38,9 | 39,9 |
| Granito | 56 | 32,9 | 34,3 | 34,8 |
| Gnaisse | | 35,4 | 37,6 | 39,7 |
| Basalto | | 43,1 | 44,0 | 43,1 |
| Diabásio | | 37,9 | 39,8 | 41,4 |
| Calcário | | - | 44,3 | 42,0 |

A Figura 58 apresenta o estudo desenvolvido por Pompeo Neto, Oliveira e Ramos (2011). Cabe destacar novamente a diferença entre o módulo de elasticidade ao

ser alterado o tipo de agregado graúdo. Nota-se que para o basalto, independente da dimensão máxima e teor de argamassa, o valor do módulo não é alterado. Entretanto, o granito é mais sensível à alteração do teor de argamassa e da dimensão máxima característica.

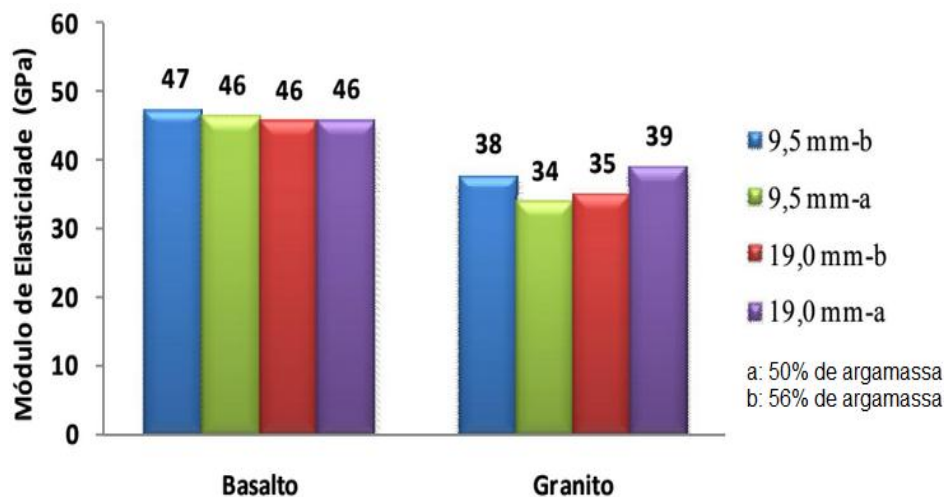


Figura 58 – Influência da dimensão máxima característica do agregado no módulo de elasticidade do concreto com $a/agl = 0,35$ (Adaptado de Pompeo Neto, Oliveira e Ramos, 2011)

O efeito do aumento da dimensão máxima característica pode ser mascarado pela redução da quantidade de água na mistura, em função da redução da superfície específica, o que poderá produzir elevação da resistência à compressão e rigidez da pasta hidratada. Rohden (2011) afirma que o aumento da dimensão máxima permite esperar melhor empacotamento da mistura, aumentando o volume de agregados presentes.

O aumento da dimensão máxima característica de um agregado graúdo permitirá a obtenção de uma mistura com menor teor de argamassa, o que elevará o volume na mistura do componente de maior módulo, refletindo assim no módulo do concreto.

Já Arruda (2013) cita que ao ser considerado o mesmo volume de agregado, a diminuição da dimensão máxima característica irá promover o aumento da superfície específica total, elevando o volume da zona de transição total, o que concorre para a redução do módulo de elasticidade. A análise da influência de cada fator sobre o módulo de deformação pode estar vinculada a uma sobreposição de efeitos, conforme já citado por Rohden (2011).

2.3.3 A zona de transição

Por zona de transição deve ser entendida a região que envolve o grão do agregado e que representa efetivamente a transição entre a fase pasta e a fase agregado. Nessa condição está formada a terceira fase do concreto, de observação microscópica, mas definidora de praticamente todas as características do concreto desde a resistência mecânica, a partir de certos valores, até a redução da durabilidade associada com o aumento da permeabilidade, tendo relação direta com a maior espessura dessa região.

Segundo Recena (2011) a zona de transição apresenta qualitativamente a mesma composição da pasta, mas, quantitativamente, menos produtos de hidratação. Também há grande quantidade de água livre, que se deposita na superfície do agregado, caracterizando assim uma zona de baixa densidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Vale ressaltar que o teor de material pulverulento e a textura do agregado, a energia de adensamento e a coesão do sistema, também podem influir sobre a aderência entre o agregado e a pasta.

Li *et al.* (1999), Aguilar *et al.* (2006), De Marchi (2011), Mehta e Monteiro (2014), Gidrão (2015), Xie *et al.* (2015), Del Bosque *et al.* (2017), Zijian *et al.* (2017) e Tibbetts *et al.* (2018) citam que o módulo de deformação do concreto é afetado diretamente pela zona de transição, influenciada pelas características dos agregados.

Barbosa (2010), Neville e Brooks (2013), Mehta e Monteiro (2014), Del Bosque *et al.* (2017) e Zijian *et al.* (2017) afirmam que a distribuição granulométrica, a dimensão máxima e o volume de agregado têm relação direta com a zona de transição. Gidrão (2015) alerta que o efeito da dimensão máxima característica não revela facilmente sua influência sobre a zona de transição, podendo esta ser afetada pela variabilidade dos materiais constituintes da mistura.

Li *et al.* (1999) e Alhadas (2008) destacam que a boa graduação dos agregados irá determinar menores espessuras dessa zona, graças à melhor dispersão e ocupação dos espaços pelo agregado e, posteriormente, pela pasta de cimento.

Dessa forma é consenso entre diversos autores (Furnas, 1997; Li *et al.*, 1999; Rodrigues, 2003; Mehta e Monteiro, 2014; Del Bosque *et al.*, 2017) que quanto menor a espessura e o volume da zona de transição, melhores são as características de rigidez do concreto. O efeito da redução da espessura da zona de transição sobre o valor do módulo pode ser verificado através da Figura 59.

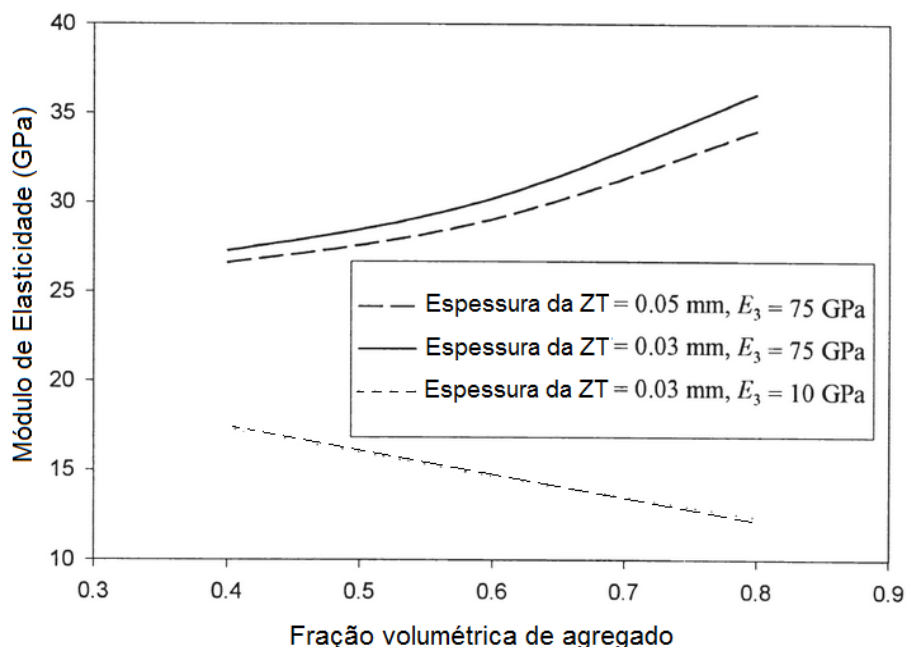


Figura 59 – Influência da espessura da zona de transição no módulo de elasticidade do concreto (Adaptado de Li *et al.*, 1999)

Com base na Figura 57 é possível verificar que a redução na espessura da zona de transição provoca aumento no módulo de elasticidade. Entretanto esse efeito é visualizado caso o agregado tenha rigidez maior que a pasta, ao contrário à medida em que aumenta a fração do agregado há redução do módulo.

Donza, Cabrera e Irassar (2002) e Chen *et al.* (2016) acrescentam que quanto maior a superfície específica da matriz granular e quanto maior a rugosidade do grão do agregado, maior será a superfície de deposição da pasta, provocando um maior travamento mecânico das fases constituintes do concreto.

Esse fato, assim exposto, pode facilitar o entendimento do porquê de ser baixo o teto de resistência obtido sobre concretos produzidos com seixo rolado de basalto, muito usado em épocas passadas em todo o sul do Brasil, quando os concretos eram projetados para atender resistências que não ultrapassavam os 15 MPa.

Por outro lado, Hashin e Monteiro (2002) citam que a zona de transição é uma região mais porosa que a pasta de cimento, sendo criada pelo efeito de interface entre o agregado e a pasta de cimento. Nesse sentido, Akçaoglu, Tokyay e Çelik (2004) e Del Bosque *et al.* (2017) citam que tanto a matriz de cimento, quanto a zona de transição são fortemente afetadas pela relação água/cimento. Diretamente, Nadeau (2003) atribuiu o crescimento do módulo de elasticidade à redução da relação água/cimento e da espessura da zona de transição.

Ramesh, Sotelino e Chen (1996) destacam que se o volume/espessura da zona de transição não é desprezível, essa fase afeta de forma significativa o módulo de elasticidade dos concretos e argamassas. Ainda, Ramesh, Sotelino e Chen (1996) e Zijian *et al.* (2017) destacam que o volume ocupado pela zona de transição é estimado entre 10% e 16,5% do volume total do composto.

Através de microscopia eletrônica de varredura ou de força atômica, a espessura da zona de transição pode ser verificada, estando em torno de 15 μm e 100 μm (PAULON e MONTEIRO, 1991; DIAMOND e HUANG, 2001; HASHIN e MONTEIRO, 2002; LEE e PARK, 2008; DEL BOSQUE *et al.*, 2017; ZIJIAN *et al.*, 2017).

Com a evolução da hidratação a espessura da zona de transição é reduzida (ZIJIAN *et al.*, 2017). Hashin e Monteiro (2002) citam que o estudo somente da zona de transição é difícil, devido à reduzida espessura dessa camada.

Há de se considerar que quanto maior a quantidade de água presente no amassamento do concreto, maior será o volume a ser exsudado e de poros gerados. Salienta-se que o aumento da exsudação justifica maior quantidade de água livre depositada na zona de transição.

Lutz, Monteiro e Zimmerman (1997), Hashin e Monteiro (2002) e Zijian *et al.* (2017) citam que o módulo de elasticidade na zona de transição é aproximadamente 40% a 50% menor do que o módulo da pasta de cimento hidratada.

O efeito da dimensão máxima característica do agregado sobre o módulo é claro. O aumento da dimensão máxima característica reduz a superfície específica, diminuindo a demanda de água na mistura. Essas condições levarão à um

composto mais rígido, tanto pela menor espessura de zona de transição gerada, quanto pela menor quantidade de água ali depositada, caso haja exsudação. Entretanto, no que tange à aplicação de agregados de menor dimensão característica na produção de concretos de alto desempenho é um tanto contraditório.

Na produção de CAD são utilizadas baixas relações água/cimento, tornando necessário o incremento de aditivos plastificantes para obter a consistência requerida. Dessa forma, o efeito da maior superfície específica ocasionada pelo agregado é suprimido pelo uso dos aditivos e não pela incorporação de água à mistura, reduzindo assim a quantidade de água livre depositada na zona de transição.

2.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO CAPÍTULO

Diante do exposto até aqui é possível constatar que as variáveis que influenciam o módulo de deformação do concreto são de difícil controle. Entretanto, deve ser revista a postura assumida em projetos estruturais com a definição de resistência característica à compressão elevada, sem que o módulo de deformação possa ser alcançado, pois é sensível a independência entre essas duas variáveis.

Muitas vezes o ensaio de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017) passou a ser questionado, não sem razão, diante de valores díspares obtidos em diferentes laboratórios, o que, até certo ponto, pode ser considerado normal em função de se tratar de um ensaio pouco realizado. No entanto, atualmente, sua execução foi bastante simplificada, principalmente pelo emprego de dispositivos mais sensíveis e confiáveis para a medição das deformações.

Quanto à preparação dos corpos de prova, no que tange à uniformidade das superfícies de trabalho, ainda há incorreções, na medida em que a falta de paralelismo entre as bases ou a falta de planicidade pode interferir nas quantificações das deformações por conta de possíveis concentrações de tensão. Por exemplo, convém citar que havendo subestimação da resistência à compressão do concreto por conta do ensaio, o valor correspondente ao nível de carregamento de 30% na verdade estará representando a deformação obtida em um nível inferior do carregamento definido.

Ainda é necessário rever os aspectos relacionados à cura dos corpos de prova. Diante da pesquisa bibliográfica realizada fica nítido que o ensaio das amostras no estado saturado ou com teor de umidade elevado irá conduzir a valores superiores de módulo, o que poderá não refletir a realidade das obras de construção civil.

Assim, é possível estabelecer procedimentos normativos mais restritivos e confiáveis com relação à própria metodologia de ensaio, quanto ao tipo de preparação do corpo de prova, ao tipo de medidor de deformação e seu posicionamento no corpo de prova, além condição de cura do concreto até o momento do ensaio, além da classe da prensa, segundo os critérios de calibração. Equipamentos servo-controlados, comandados eletronicamente, permitem que o ensaio seja realizado em uma velocidade mais controlada, contribuindo para a precisão dos resultados.

Praticamente todos os estudos consultados e referidos no texto não consideraram o isolamento das variáveis envolvidas no processo para a determinação do valor do módulo, permitindo supor haver sempre a sobreposição de efeitos, o que justifica afirmações, até certo ponto, contraditórias. Por exemplo, muitos trabalhos partem da variação da resistência através da alteração da relação água/cimento e, conseqüentemente, do traço em massa. Essa alternativa é intuitiva e respeita os preceitos básicos, quase dogmáticos, da tecnologia clássica do concreto. No entanto, é preciso considerar que a alteração da relação água/cimento conduz a mudanças no traço, no volume de pasta e no comportamento reológico. Os parâmetros de dosagem mais uma vez acabam por se sobrepôr, causando uma sinergia de efeitos.

Um concreto pode ser concebido fracionadamente. Primeiro uma pasta, material cimentante e água. Evidentemente que as características dessa mistura serão as características da pasta. Ao ser incorporada a areia, o agregado miúdo, é introduzido um esqueleto granular e as características do aglomerado passam a ser definidas a partir da alteração do comportamento da mistura pela inclusão do agregado miúdo. Quando é adicionado o agregado graúdo nova mudança é produzida, sendo definido um novo arranjo granular e o agregado graúdo passa a ser o elemento definidor das características da nova formação.

Em igualdade de condições, ou seja, em um mesmo concreto, quanto maior for o volume de pasta, mais as características de deformação serão influenciadas pelo comportamento desta. Se for elevado o teor de argamassa acima de determinados limites, é possível esperar haver alguma alteração e, por último, a elevação do teor de agregado graúdo na mistura, o que produz uma redução no volume de pasta que determinará a influência do comportamento do agregado graúdo nas características da mistura.

Partindo dessa assertiva, é de fundamental importância o isolamento desses variáveis de dosagem e de sua influência sobre o processo, para que, além de permitir a otimização individual de cada uma delas, possa ser definido um roteiro para a escolha dos materiais e permitir orientar o projeto de maneira a equalizar a resistência à compressão com um valor de módulo atingível, ao contrário do que se observa quando os valores de resistência são definidos para o atingimento de um módulo estimado teoricamente e nem sempre atingível, na prática, principalmente para valores mais elevados.

3 PREDIÇÃO DO MÓDULO

A estimativa do valor do módulo de deformação pode ser feita tanto com o emprego de fórmulas apresentadas pela bibliografia existente sobre o assunto, como pela normalização vigente. A adoção de modelos teóricos para predição do módulo representa sempre um procedimento de verificação, principalmente para estimativa de deformações.

Em geral, a variável de entrada nos modelos teóricos será sempre a resistência à compressão como se esta fosse a única interveniente na definição do módulo de deformação (BAYAZIDI *et al.*, 2014). Em algumas situações como no *fib* Model Code (2010) e na NBR 6118 (ABNT, 2014), o tipo de agregado é incorporado ao modelo na forma de coeficiente.

Para Pereira Neto e Djanikian (1995) e Silva (2003) há diversas limitações para as equações propostas, dentre elas:

- a) as equações não avaliam diferentes proporções na mistura do concreto;
- b) as equações baseiam-se nas características observadas aos 28 dias de idade, sem considerar crescimentos posteriores.

Araújo (2000) cita que a diferença entre resultados experimentais e os obtidos por referências normativas é muito grande. Assim, qualquer fórmula que correlacione a resistência à compressão diretamente com o valor do módulo, deve ser considerada com alguma reserva.

Aguilar *et al.* (2006) concluem que as equações para avaliar o módulo do concreto são uma aproximação e podem conduzir a erros grosseiros. Essa afirmação deve-se ao fato de que grande parte das equações levam em consideração apenas a resistência à compressão, desprezando qualquer outra variável.

Infelizmente, muitos engenheiros projetistas, ainda, determinam o valor do módulo pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e posteriormente realizam a tentativa de confirmar pelo ensaio experimental de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017), nem sempre havendo a confirmação do valor teórico, em geral superestimado.

Nos itens a seguir serão apresentadas as equações mais utilizadas e outras constantes da bibliografia consultada.

3.1 NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) prevê equações para a determinação do módulo de elasticidade e de deformação, com base na resistência à compressão do concreto e no tipo do agregado graúdo. Com o tempo essa equação sofreu alguns ajustes, desde a primeira revisão da norma, em 1978, até a atual, de 2014. A Tabela 13 apresenta a evolução da equação normativa nacional para o módulo de elasticidade e de deformação.

Tabela 13 – Evolução da equação normativa da NBR 6118

| Ano | Módulo de Elasticidade (E_{ci}) | Módulo de Deformação (E_{cs}) |
|--------------|---|---|
| 1978 | $E_{ci} = 6600 \times \sqrt{f_{cm} + 3,5}$ | $E_{cs} = 0,90 \times E_{ci}$ |
| 2003 | - $f_{ck} \leq 50$ MPa | $E_{cs} = 0,85 \times E_{ci}$ |
| 2007 | $E_{ci} = 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$ | |
| 2014 (atual) | <p>- $20 \leq f_{ck} \leq 50$ MPa</p> $E_{ci} = \alpha_e \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$ <p>- $55 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa</p> $E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_e \times \sqrt[3]{\frac{f_{ck}}{10}} \times 1,25$ <p>Onde:</p> <ul style="list-style-type: none"> α_e : 1,2 para basalto e diabásio α_e : 1,0 para granito e gnaisse α_e : 0,9 para calcário α_e : 0,7 para arenito | $E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci}$ Onde: $\alpha_i = \left[0,8 + 0,2 \times \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \right]$ |

Pela definição do item 3.4 da NBR 8522 (ABNT, 2017), o módulo de elasticidade e de deformação no nível de carregamento a 30% da resistência devem apresentar o mesmo resultado. Assim as equações devem conduzir ao mesmo valor, fato que não ocorre, exceto para a resistência característica à compressão de 80 MPa.

Atualmente, um coeficiente de correção em função do tipo de agregado graúdo, é utilizado na determinação do módulo, havendo duas equações, aplicáveis para duas faixas de resistência.

Diversos estudos foram conduzidos em períodos diferentes a fim de verificar a aderência entre os resultados experimentais e os estimados diretamente por uma

das equações apresentadas na Tabela 13, conforme a revisão em vigor. Em alguns casos os valores experimentais coincidem com aqueles estimados.

Dessa forma, serão apresentados alguns estudos relacionados com as revisões da NBR 6118, a fim de verificar o comportamento dos valores experimentais frente aos determinados a partir das equações propostas.

Pacheco (2006), estudando classes de resistência à compressão de 25 MPa e 30 MPa dos concretos entregues por quatro (04) centrais fornecedoras da região de Vitória/ES, preparados com agregado graúdo granítico, verificou que a aplicação da equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2003) conduz a erros da ordem de 3,46%, enquanto que a equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 1978) pode gerar discrepâncias superiores a 20%. Assim, concluiu que o modelo proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2003) atendia à necessidade da região de Vitória/ES.

A Figura 60 apresenta os resultados do estudo de Alhadass (2008), que compreendeu seis (06) cidades de Minas Gerais, no qual encontrou valores superiores do módulo de deformação determinado experimentalmente para todos os tipos de agregados e resistência à compressão, em comparação aos calculados conforme a NBR 6118 (ABNT, 2003).

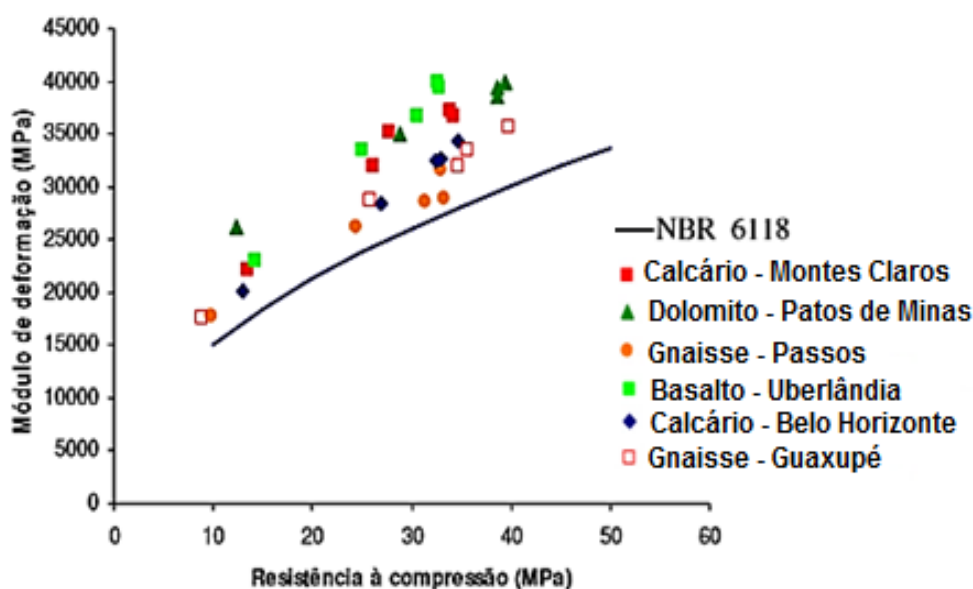


Figura 60 – Comparativo com a NBR 6118:2003 *versus* concretos de Minas Gerais/MG (Adaptado de Alhadass, 2008)

Nunes (2005) avaliou os concretos produzidos no Rio de Janeiro/RJ e verificou que a NBR 6118 (ABNT, 2003) superestimava os valores do módulo de elasticidade, quando comparado aos resultados experimentais obtidos (Figura 61).

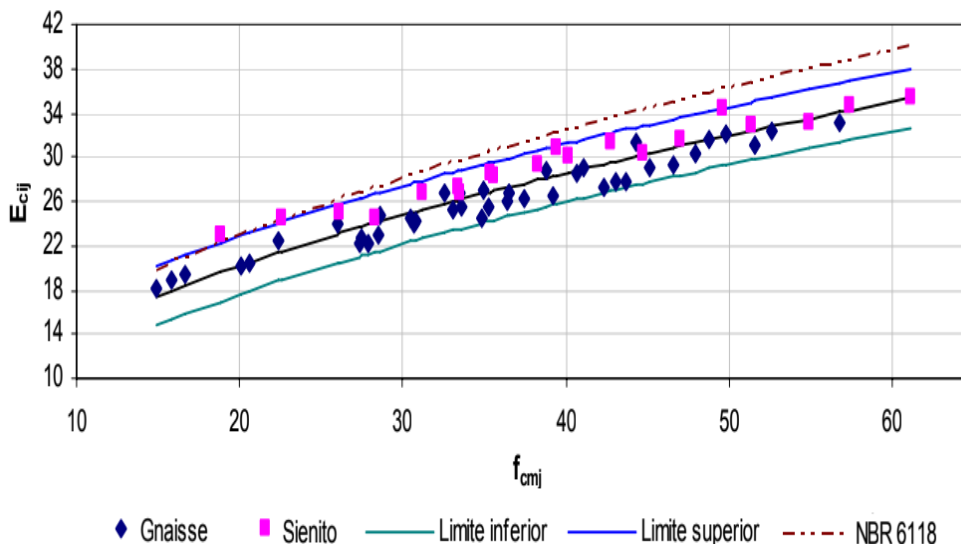


Figura 61 – Comparativo com a NBR 6118:2003 *versus* concretos do Rio de Janeiro/RJ (Nunes, 2005)

Canesso *et al.* (2007) e Toralles-Carbonari *et al.* (2008) obtiveram o mesmo comportamento. Entretanto, Toralles-Carbonari *et al.* (2008) justificaram seus resultados ao fato da antiga NBR 6118 (ABNT, 2003) não contemplar uma equação para resistência à compressão superior a 50 MPa.

Já Martins (2008) informa que concretos produzidos em Goiânia/GO, com rocha granítica, apresentam valores inferiores no ensaio de módulo de deformação, em comparação aos calculados conforme a NBR 6118 (ABNT, 2003), independentemente do tamanho de corpo de prova utilizado no ensaio e da resistência à compressão (25 MPa, 30 MPa e 40 MPa).

Dando sequência às investigações na região de Goiânia/GO, Barbosa (2009) verificou a influência de agregados graúdos do tipo granulito, basalto e micaxisto nos valores experimentais de módulo de elasticidade e comparou-os com os obtidos através da NBR 6118 (ABNT, 2003). Na Figura 62 é possível verificar que apenas o agregado de basalto possui resultados superiores aos obtidos pela aplicação da fórmula apresentada pela referida norma.

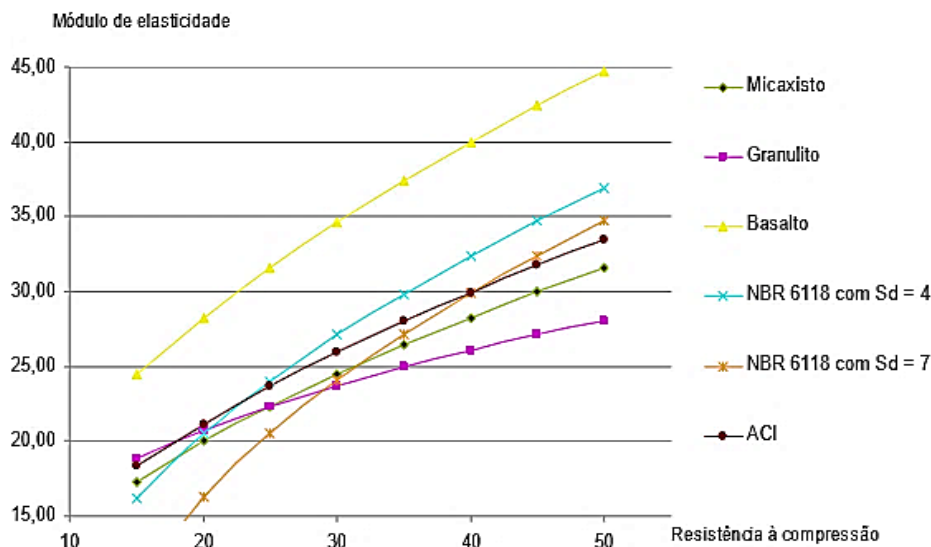


Figura 62 – Comparativo com a NBR 6118:2003 versus concretos de Goiânia/GO (Barbosa, 2009) Arruda (2013) estudou concretos com resistência à compressão de 20 MPa, 30 MPa e 40 MPa produzidos com basalto e dolomito da região do Triângulo Mineiro. Ao final do estudo concluiu que os valores estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2007) são inferiores aos obtidos experimentalmente. Na região de Brasília/DF, Bauer, Pereira e Leal (2012) acusaram o mesmo comportamento para diferentes concretos (C20, C30 e C40).

De Marchi (2011), realizando estudo de determinação probabilística, constatou que o valor médio do módulo é superior ao prescrito na equação da NBR 6118 (ABNT, 2007) para as resistências características à compressão de 25 e 30 MPa para concretos produzidos na região de São Paulo/SP, alertando que o módulo segue uma distribuição probabilística, incorrendo no risco de não atendimento em grande parte dos casos.

Gidrão (2015) constatou que os valores estimados via NBR 6118 (ABNT, 2014) se aproximam dos obtidos experimentalmente. Assim, o autor destaca que, embora as estimativas empíricas não considerem fatores como fração volumétrica, módulo individual dos materiais da mistura e características da zona de transição, a NBR 6118 (ABNT, 2014) se mostra precisa.

Santos *et al.* (2017) destacam que os valores experimentais são ligeiramente superiores aos determinados pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Lenz (2016) e Kummer (2016), em estudos realizados na região sul do país, nas cidades de Curitiba/PR e Lajeado/RS, verificaram que os valores calculados conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014) são superiores aos determinados experimentalmente com base na NBR 8522 para as resistências à compressão entre 20 MPa e 50 MPa (Figura 63), valores já apontados por Dal Molin e Monteiro (1996).

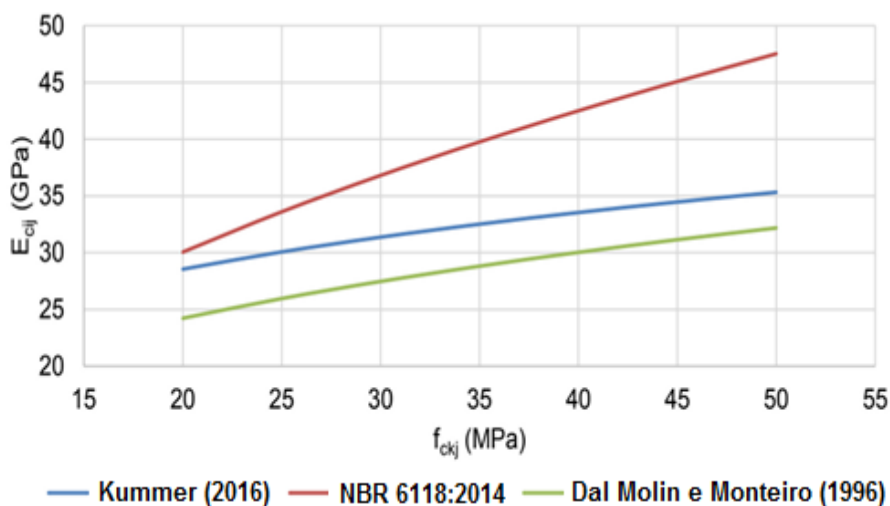


Figura 63 – Comparativo com a NBR 6118:2014 *versus* concretos de Lajeado/RS (Adaptado de Kummer, 2016)

Borin, Falcão Bauer e Figueiredo (2012) alertam que normalmente os engenheiros projetistas estimam e consideram de forma absoluta os valores calculados através da modelagem matemática definida pela NBR 6118 quando se trata de uma variável aleatória que pode apresentar divergências em relação aos valores estimados. As fórmulas são apenas estimadores, havendo erros embutidos.

Em suma, Borin, Falcão Bauer e Figueiredo (2012) destacam a importância de um estudo preliminar do concreto em laboratório, a fim de verificar se o valor do módulo de deformação é atingido. Um bom exemplo disso foi o estudo conduzido por Kummer (2016), que desenvolveu um estudo de dosagem para o módulo de deformação com os materiais utilizados em central fornecedora de concreto, cujo objetivo secundário era verificar a exatidão dos valores experimentais com os calculados pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Diante da breve retrospectiva acerca da NBR 6118 é possível afirmar que nas diferentes revisões do modelo de previsão, os valores teóricos não convergem aos obtidos experimentalmente. Isto mostra a fragilidade e a insegurança no uso da equação.

3.2 NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL

Internacionalmente os modelos empíricos mais utilizados são os constantes no EUROCODE-2 (2005), no *fib* Model Code (2010) e na ACI 318 (2014), os quais levam também, em sua essência, para estimativa do módulo de deformação ou de elasticidade a resistência à compressão do concreto. A Tabela 14 apresenta as equações para a determinação empírica para o módulo de elasticidade e de deformação.

Tabela 14 – Equações normativas internacionais para módulo de elasticidade e deformação

| Norma | Módulo de Elasticidade (E_{ci}) | Módulo de Deformação (E_{cs}) |
|------------------------------|---|---|
| EUROCODE 2 (2005) | <p>- $12 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa</p> $E_{ci} = 23,1 \times \alpha_e \times \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3}$ <p>Onde: α_e : 1,2 para basalto e diabásio α_e : 1,0 para granito e gnaisse α_e : 0,9 para calcário α_e : 0,7 para arenito</p> | $E_{cs} = 22 \times \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$ <p>Onde: f_{cm} : resistência média aos 28 dias. - Determinado a $0,4 f_{cm}$</p> |
| <i>fib</i> Model Code (2010) | <p>- $12 \leq f_{ck} \leq 80$ MPa</p> $E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_e \times \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{1/3}$ <p>Onde: α_e : 1,2 para basalto e diabásio α_e : 1,0 para granito e gnaisse α_e : 0,9 para calcário α_e : 0,7 para arenito</p> | $E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci}$ <p>Onde: $\alpha_i = \left[0,8 + 0,2 \times \left(\frac{f_{ck}}{88} \right) \right]$</p> |
| ACI 318 (2014) | $E_{ci} = 5170 \times \sqrt{f_{ck}}$ <p>- Determinado a $0,45 f_c$</p> | $E_{cs} = 4700 \times \sqrt{f_{ck}}$ |

Deve ser citado que os modelos matemáticos são, em geral, definidos para a resistência característica à compressão e não para a resistência média aos 28 dias de idade.

Gidrão (2015) destaca que os valores obtidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) apresentam menor variação (12,2%) ao comparar aos obtidos pelo método do

ACI 318 (16,3%). Ainda, o autor verificou que o modelo do *fib* Model Code é o que apresenta maior divergência dos resultados experimentais.

Bilesky (2016) calculou para diversas classes de resistência característica à compressão, os resultados do módulo de deformação pelas diferentes equações empíricas, comparando-as com a NBR 6118 (ABNT, 2014), conforme apresentado na Figura 64.

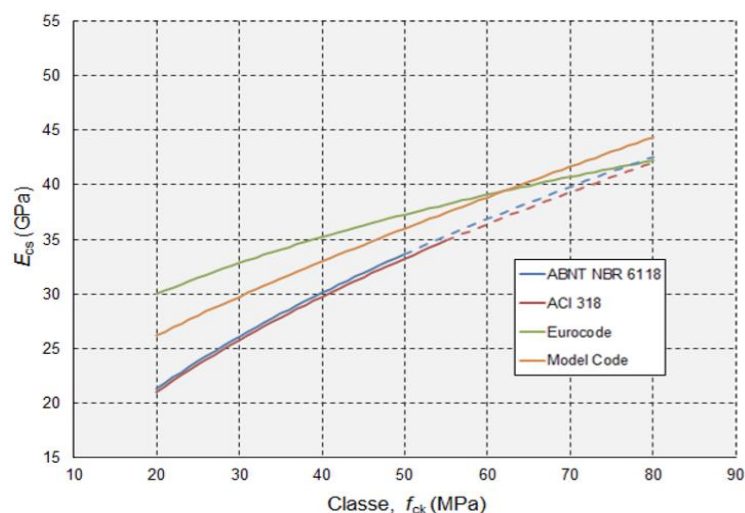


Figura 64 – Comportamento geral das equações internacionais comparando à NBR 6118:2014 (Bilesky, 2016)

O método do ACI 318 e da NBR 6118 conduzem a valores de mesma ordem de grandeza, enquanto que os valores do *fib* Model Code e EUROCODE 2 apresentam valores mais elevados.

Na Figura 65 estão apresentados os resultados do módulo de elasticidade do estudo realizado por Cabral (2014), onde se verifica que tanto o concreto autoadensável, quanto o concreto fluído, apresentaram valores bem aquém daqueles obtidos de modelos propostos internacionalmente, ressaltando a diferença apresentada pelo modelo proposto pelo *fib* Model Code.

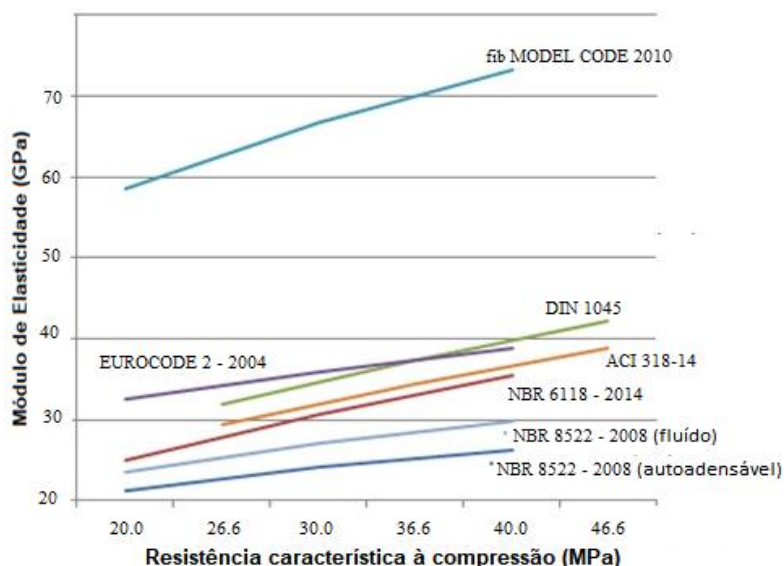


Figura 65 – Comparativo entre concretos plásticos e autoadensável versus equações internacionais (Cabral, 2014)

Cabral (2014) salienta que os modelos propostos são inadequados para a obtenção de valores do módulo, sendo normalmente superiores ao determinado experimentalmente, indicando que essas referências não podem ser utilizadas indiscriminadamente.

Arruda (2013) verificou que o modelo proposto pelo *fib* Model Code é o que fornece valores que mais se assemelham aos resultados experimentais, enquanto que a equação proposta pelo ACI 318 conduziu a valores inferiores, e o EUROCODE 2 superestima os resultados. Para Toralles-Carbonari *et al.* (2008) os valores do *fib* Model Code apresentaram uma boa relação com os obtidos experimentalmente.

Alhadas (2008) ressalta que as equações propostas pela ACI 318 e EUROCODE 2 são conservadoras e, conseqüentemente, mais seguras, pois estimam valores inferiores aos encontrados nos ensaios (Figura 66). Pacheco (2006) também constatou que o modelo do ACI 318 conduz a resultados inferiores aos determinados experimentalmente.

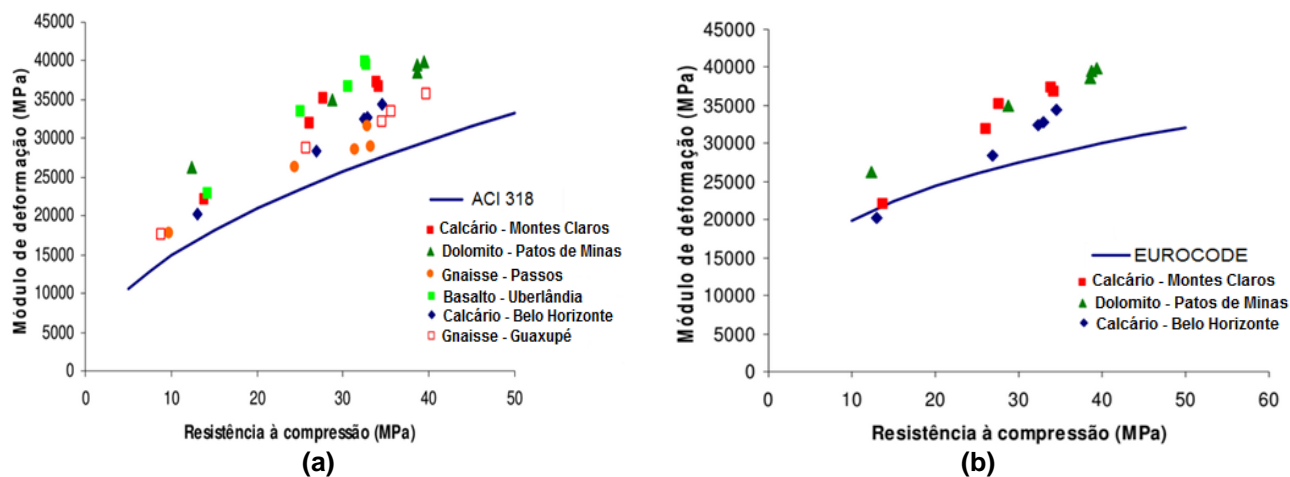


Figura 66 – Comparação com normas internacionais: (a) ACI 318 (a) e (b) EUROCODE 2 (Adaptado de Alhadad, 2008)

Essa diferença nos resultados está ligada ao nível de carregamento utilizado durante o ensaio, pois a NBR 8522 (ABNT, 2017) adota 30% da resistência média, enquanto que o método ACI 318 utiliza a taxa de 45% da resistência do concreto.

3.3 OUTROS MODELOS PROPOSTOS

A maior parte dos estudos desenvolvidos em torno do módulo de deformação ou de elasticidade, baseia-se na verificação de uma dada resistência à compressão na idade de 28 dias. Com base nessa resistência à compressão normalmente são realizados os comparativos entre a normalização nacional e internacional, conforme já apresentado nos itens 3.1 e 3.2.

Alguns modelos foram avaliados para grupos específicos de resistência à compressão, agregados, relações a/c e até mesmo pela dimensão do corpo de prova. A Tabela 15 apresenta diversos modelos determinados com base no objeto de estudo, no qual normalmente trata-se da resistência à compressão.

Tabela 15 – Equações experimentais propostas por diversos autores

| Estudo | Equação | Observação |
|---|--|---|
| Carrasquillo, Slate e Nilson (1981) | $E_{cs} = 3320\sqrt{f_c} + 6900$ | - Calcário e Seixo - $21 \leq f_c \leq 83$ MPa |
| Gomes (1995) | $E_{cs} = 8142f_c^{0,37}$ | - Traquito e Gnaiss |
| Ferrari (1995) | $E_{cs} = 3691\sqrt{f_c} + 5445$ | - Calcário e Gnaiss - $10 \leq f_c \leq 80$ MPa |
| Dal Molin e Monteiro (1996) | $E_{cs} = 9570f_{ck}^{0,31}$ | - Basalto - $20 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa |
| Melo Neto e Helene (2002) | $E_{ci} = 3,3736 \times f_c^{0,6002}$ | - Granito - $20 \leq f_c \leq 30$ MPa - São Paulo/SP |
| Nunes (2005) | $E_{ci} = 5,0f_{ck}^{0,5} \pm 3,42$ | - Gnaiss e Sienito - Rio de Janeiro/RJ |
| Pacheco (2006) | $E_{ci} = 5400f_{cm}^{0,5}$ | - Granito - Vitória/ES |
| Silva <i>et al.</i> (2008) | $E_{ci} = 0,0322f_c^2 - 0,9425f_c + 42,929$ | - Granito - $18 \leq f_c \leq 32$ MPa - Salvador/BA |
| Martins (2008) | $E_{cs} = 10,467f_c^{0,2693}$ | - Granito - Amostras (10x20) cm - $25 \leq f_c \leq 55$ MPa - Goiânia/GO |
| | $E_{cs} = 9,3309f_c^{0,2679}$ | - Granito - Amostras (15x30) cm - $25 \leq f_c \leq 55$ MPa - Goiânia/GO |
| Barbosa (2009) | $E_{ci} = 7720 \times \sqrt[3]{f_c}$ | - Granulito - $29 \leq f_c \leq 51$ MPa - Goiânia/GO |
| | $E_{ci} = 6320 \times \sqrt{f_c}$ | - Basalto - $28 \leq f_c \leq 47$ MPa - Goiânia/GO |
| | $E_{ci} = 4470 \times \sqrt{f_c}$ | - Micaxisto - $28 \leq f_c \leq 46$ MPa - Goiânia/GO |
| Leal (2012) | $E_{cs} = 13,783 \times f_{ck}^{0,2306}$ | - Calcário - $15 \leq f_{ck} \leq 45$ MPa - Brasília/DF |
| Cabral (2014) | $E_{ci} = \frac{41}{2a/c}$ | - Granito - $0,45 \leq a/c \leq 0,75$ - São Paulo/SP |
| Kummer (2016) | $E_{ci} = 14,225f_{ck}^{0,2325}$ | - Basalto - $20 \leq f_{ck} \leq 50$ MPa - Lajeado/RS |
| Bilesky (2016) | $E_{cs} = -0,0054f_c^2 + 0,8035f_c + 9,3494$ | - Calcário - $20 \leq f_c \leq 80$ MPa - São Paulo/SP |
| | $E_{ci} = -0,0058f_c^2 + 0,926f_c + 8,8833$ | |
| | $E_{cs} = -0,0049f_c^2 + 0,8587f_c + 6,9334$ | - Diabásio - $20 \leq f_c \leq 80$ MPa - São Paulo/SP |
| | $E_{ci} = -0,0053f_c^2 + 0,9721f_c + 6,8743$ | |
| | $E_{cs} = -0,0046f_c^2 + 0,7539f_c + 7,0497$ | |
| $E_{ci} = -0,0051f_c^2 + 0,8568f_c + 6,996$ | - Granito - $20 \leq f_c \leq 80$ MPa - São Paulo/SP | |

Onde: a/c = relação água/cimento; f_c = resistência à compressão; f_{cm} = resistência média à compressão; f_{ck} = resistência característica à compressão; E_{ci} = módulo de elasticidade; E_{cs} = módulo de deformação secante.

Campos, Barbosa e Maciel (2018), na tentativa de modelagem para os concretos autoadensáveis com base somente na resistência à compressão, obtiveram correlação muito baixa.

Algumas equações trabalham com modelagem micromecânica, onde é levada em consideração a deformação de cada constituinte do concreto, por exemplo, a argamassa, o agregado graúdo e a zona de transição.

Um exemplo dessa modelagem foi o trabalho desenvolvido por Barbosa (2010) no qual foram adotados os princípios da teoria de Mori-Tanaka, o autor comprovou que os resultados calculados pelo modelo micromecânico têm uma boa aproximação com os valores obtidos a partir da aplicação das equações apresentadas pela NBR 6118 e *fib* Model Code.

Os estudos de Zhou, Lydon e Barr (1995), Yang e Huang (1996) e Cui *et al.* (2012) com modelagem micromecânica levam a resultados com erros máximos compreendidos entre 1,35% e 10%, ao comparar os resultados experimentais com os obtidos do cálculo pela modelagem.

Como o concreto é produzido em larga escala, fica difícil quantificar e caracterizar as variáveis a serem utilizadas na modelagem micromecânica para determinar o módulo de deformação e/ou de elasticidade do concreto, em função das esperadas variações inerentes ao processo produtivo.

Por outro lado, em algumas situações, a aplicação de modelos teóricos pode ser de grande valia. Vilardeil *et al.* (1998) citam que a determinação do módulo de elasticidade de concretos usados em barragens é de difícil determinação, pois é exigida uma estrutura complexa, visto o tamanho das amostras (45 x 45 x 90) cm adotadas para uma avaliação mais real. Entretanto os autores citam que com a utilização da modelagem micromecânica de compósitos é possível, a partir das características elásticas de cada componente do concreto, determinar o módulo de elasticidade do concreto para barragens, com resultados similares aos determinados experimentalmente.

Montija (2007) e Silva *et al.* (2008) afirmam que dada a relevância do módulo no projeto estrutural, é imprescindível a conformidade do valor real e o utilizado como parâmetro de cálculo no projeto. Dessa forma torna-se necessária a realização de

ensaios, garantindo, assim, segurança e previsibilidade no comportamento quanto à deformação para as estruturas de concreto armado.

3.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS DO CAPÍTULO

A existência de normas que apresentam diferentes fórmulas para a estimativa do valor do módulo de deformação sempre representou uma alternativa facilitadora na definição desse parâmetro em projetos estruturais.

Diante do explanado no capítulo 3, é possível verificar que as equações propostas desde a NBR 6118 (ABNT, 1978) para alguns estudos satisfaz o comportamento experimental e para outros não há coerência. A execução do ensaio, conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017), é muitas vezes questionada, não sem razão diante de valores díspares obtidos experimentalmente, quando comparado ao definido pela normalização.

É necessário destacar que, independentemente da abordagem teórica adotada para estimar o valor do módulo, os resultados obtidos experimentalmente devem ser sempre superiores a esse, razão para manter a estrutura em segurança.

Muitas vezes, a solução adotada por projetistas estruturais é a elevação da resistência à compressão do concreto, o que eleva o valor do módulo estimado conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014). O problema que se apresenta, então, se resume ao fato de que não há garantia da elevação do módulo com base nessa premissa.

Nesse sentido é possível afirmar que a resistência à compressão não é o único fator impactante na determinação empírica do módulo de elasticidade ou de deformação.

Diante do exposto nesse capítulo é notório o descolamento entre os valores determinados experimentalmente e os teóricos, podendo conduzir ao surgimento de grandes deformações nas estruturas assim edificadas.

Lam e Jefferis (2011) citam que o valor da constante nos modelos teóricos depende exclusivamente da proporção da mistura e da densidade dos materiais empregados. Dessa maneira, as equações regionalizadas são mais precisas.

Entretanto, seria inviável a NBR 6118 (ABNT, 2014) especificar equações setoriais para o país, dependendo do estado ou região, pois demandaria uma quantidade enorme de outros estudos para suprir toda a gama de materiais e variáveis de ensaio.

Outra hipótese, seria a restrição para os valores passíveis de estimava à uma faixa de resistência à compressão de no máximo 30 MPa, por exemplo.

O procedimento mais adequado é a avaliação prévia do valor do módulo do concreto a ser utilizado na estrutura. Havendo variações nos materiais empregados na produção do concreto ao longo da obra é necessário realizar periodicamente verificações. Dessa maneira, num horizonte mais distante, há de se refletir sobre o estudo do controle estatístico sobre o módulo de deformação ou elasticidade, conforme objeto de estudos de alguns autores.

Assim, a importância em verificar a interferência isolada do efeito causado ao módulo de deformação pelas variáveis de dosagem é de fundamental importância para o entendimento do comportamento do concreto, bem como para estabelecer critérios de escolha de materiais a serem utilizados, visando a obtenção do valor adequado exigido em projeto.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O planejamento da presente tese baseia-se no estudo e desenvolvimento das etapas apresentadas no fluxograma da Figura 67.

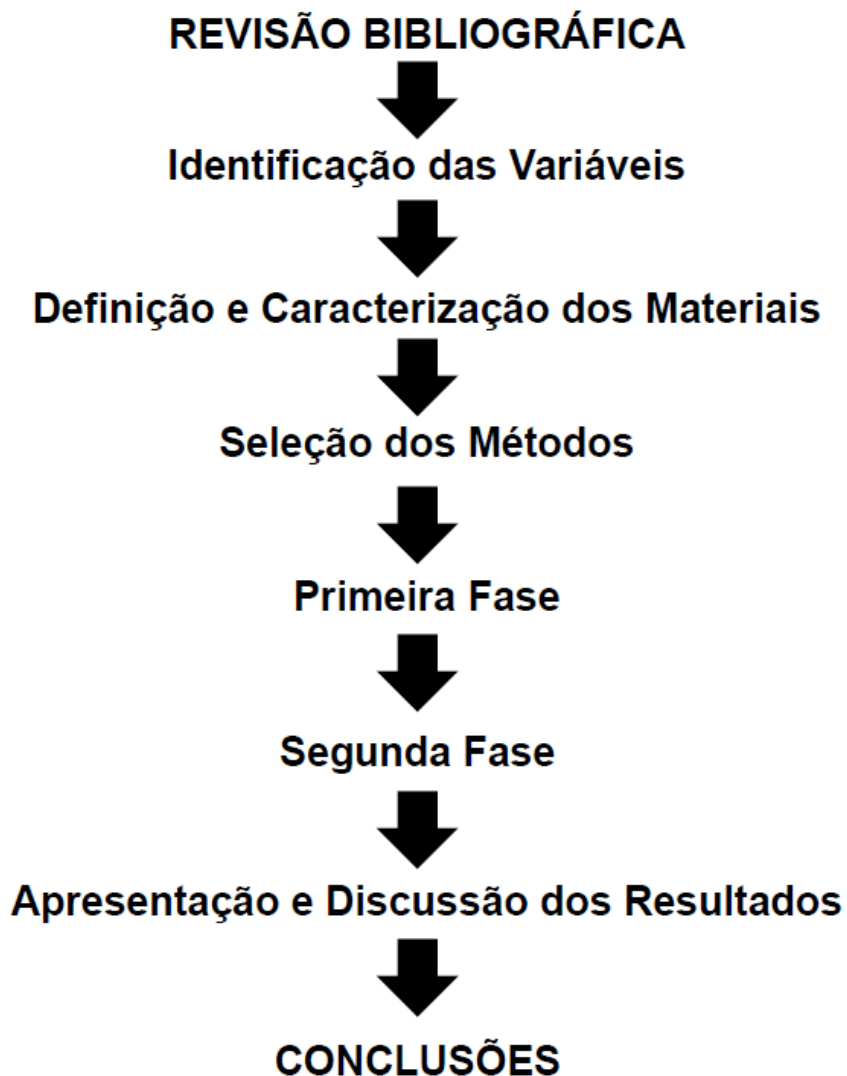


Figura 67 – Planejamento do estudo

Com base na revisão bibliográfica e no levantamento realizado sobre os resultados do Laboratório de Materiais de Construção Civil da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) é possível inferir que não só a resistência à compressão tem relação com o valor do módulo do concreto de cimento Portland.

Assim, a partir da revisão bibliográfica apresentada, foram identificados como principais parâmetros de dosagem que influenciam no valor do módulo de deformação os seguintes variáveis:

- a) volume de pasta:** parte do pressuposto de que o concreto, por ser formado por materiais com maior rigidez (agregados) e outro com maiores deformações (pasta), à medida em que estes parâmetros se alteram, há variação no valor módulo;
- b) resistência à compressão:** esse parâmetro pode ser considerado o mais importante por ser o dado de entrada nos modelos matemáticos apresentados em diferentes normas: EUROCODE-2 (2005), *fib* Model Code (2010), ACI 318 (2014), NBR 6118 (ABNT, 2014) e citado por diferentes autores: Guimarães e Santos (1999); Melo Neto e Helene (2002); Rossignolo (2005); Araújo (2008); De Marchi *et al.* (2010); Barbosa, Yanez e Carneiro (2011); Pompeo Neto, Oliveira e Ramos (2011); Araújo, Guimarães e Geyer (2012); Bauer, Pereira e Leal (2012); Borin, Falcão Bauer e Figueiredo (2012); Arruda (2013); Cabral (2014), Cabral, Monteiro e Helene (2014); Kummer (2016) e Lenz (2016) na estimativa de valores teóricos para o módulo. Entretanto, o levantamento de dados e estudos citam que não há uma relação direta entre a resistência à compressão e a rigidez do concreto;
- c) teor de argamassa:** define a proporção entre argamassa e agregado gráúdo utilizado na mistura dos concretos, e o aumento do teor de argamassa, reduz a quantidade de agregado gráúdo, alterando o módulo;
- d) tipo do agregado gráúdo:** apresentam comportamentos distintos, destacando-se a massa específica absoluta, porosidade, resistência à compressão e módulo;
- e) tipo de cura:** afeta diretamente o grau e a forma de hidratação dos compostos cimentícios. Dessa maneira é possível inferir que alterações nessas condições, refletem na rigidez da pasta, e conseqüentemente, do concreto;
- f) idade:** o grau de hidratação da pasta de cimento Portland aumenta com a evolução do tempo. Com isso as variáveis de dosagem: volume de pasta, resistência à compressão, teor de argamassa, tipo de agregado gráúdo e de cura serão submetidos à avaliação frente a diferentes idades de ensaio.

4.1 MATERIAIS EMPREGADOS NO ESTUDO

Os materiais empregados no programa experimental são oriundos de amostra única, tomada como referência para todo o trabalho.

Foram utilizados, um cimento Portland tipo V-ARI e uma cinza volante, os quais foram submetidos à caracterização físico-mecânica e química.

Os agregados utilizados foram uma areia natural quartzosa e três (03) agregados graúdos, identificados no varejo, respectivamente, pelo nome comercial de areia média, basalto, granito e diabásio. Para esses materiais foi realizada a caracterização físico-mecânica.

Na preparação dos concretos foi usada água de abastecimento público da cidade de Porto Alegre/RS. Também foi utilizado, quando necessário, para não interferir na operação de moldagem dos corpos de prova, foi empregado um aditivo superplastificante à base de polímeros de éter carboxílico, isento de cloretos.

A caracterização dos materiais, em sua maioria, foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC).

Nos itens a seguir serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos aglomerantes e agregados utilizados no estudo.

4.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado no estudo (CP V ARI) foi submetido à caracterização física segundo as normas NBR 12826 (ABNT, 2014), NBR 16372 (ABNT, 2015), NBR 16605 (ABNT, 2017), NBR 16606 (ABNT, 2017) e NBR 16607 (ABNT, 2017). Os resultados da caracterização física do cimento são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Caracterização física do cimento Portland

| Caracterização | | | | Requisitos (NBR 16697:2018) |
|--------------------------------|---------------------------|------------|------|--------------------------------|
| Finura | Resíduo retido na peneira | n°200 | 0,4% | ≤ 6,0% |
| | | n°325 | 2,0% | - |
| Pasta de consistência normal | 29,6 % de água | | | - |
| Tempos de Pega | Início | 2h e 05min | | ≥ 1h |
| | Fim | 4h e 00min | | ≤ 10h |
| Superfície específica “Blaine” | 5020 cm ² /g | | | ≥ 3000 cm ² /g |
| Massa específica absoluta | 3,01 g/cm ³ | | | - |

Diante da caracterização apresentada na Tabela 16 é possível verificar que o cimento atende aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018).

A determinação da resistência à compressão do cimento Portland foi realizada conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996), cujos os resultados constam na Tabela 17.

Tabela 17 – Resistência à compressão do cimento Portland

| Idade (dias) | Resistência à compressão (MPa) | | | | | Desvio relativo máximo (%) | Requisitos (NBR 16697:2018) |
|--------------|--------------------------------|-------|-------|----------|-------|----------------------------|-----------------------------|
| | C.P 1 | C.P 2 | C.P 3 | C.P 4 | Média | | |
| 01 | 21,9 | 21,9 | 21,0 | 22,6 | 21,9 | 5,7 | ≥ 14,0 MPa |
| 03 | 31,2 | 31,0 | 30,9 | 31,7 | 31,2 | 1,6 | ≥ 24,0 MPa |
| 07 | 34,2 | 35,4 | 36,7 | 35,8 | 35,5 | 3,7 | ≥ 34,0 MPa |
| 28 | 42,8 | 45,5 | 44,1 | 43,9 | 44,1 | 3,2 | - |
| 150 | 51,8 | 51,8 | 50,7 | 55,8 (*) | 51,4 | 1,4 | - |

Índice de consistência da argamassa padrão = 179 mm

(*) valor desconsiderado por diferir mais de 6% em relação à média original.

A resistência à compressão atende aos requisitos prescritos na NBR 16697 (ABNT, 2018) referente às idades de 1, 3 e 7 dias.

A distribuição granulométrica dos grãos de cimento e a superfície específica BET foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Diâmetro e superfície específica BET do cimento

| | |
|----------------------|-------------------------|
| Diâmetro a 10% | 1,38 µm |
| Diâmetro a 50% | 11,83 µm |
| Diâmetro a 90% | 32,37 µm |
| Diâmetro médio | 15,19 µm |
| Área superficial BET | 4.434 m ² /g |

O cimento utilizado no estudo foi submetido à análise química, segundo o recomendado pelas NBR NM 18 (ABNT, 2012) e NBR NM 22 (ABNT, 2012) e por Fluorescência de Raios – X (FRX), cujos resultados estão apresentados na Tabela 19. A análise foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

Tabela 19 – Composição química quantitativa do cimento

| Determinação | % em massa | Requisitos (NBR 16697, 2018) |
|---|------------|---------------------------------|
| Óxido de cálcio (CaO) | 59,22 | - |
| Óxido de silício (SiO ₂) | 17,39 | - |
| Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) | 6,12 | - |
| Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) | 4,26 | - |
| Óxido de magnésio (MgO) | 1,47 | ≤ 6,5% |
| Óxido de potássio (K ₂ O) | 1,09 | - |
| Óxido de titânio (TiO ₂) | 0,57 | - |
| Óxido de fósforo (P ₂ O ₅) | 0,17 | - |
| Óxido de manganês (MnO) | 0,14 | - |
| Óxido de enxofre (SO ₃) | 5,80 | - |
| Perda ao fogo (1000°C) | 3,59 | ≤ 6,5% |
| Resíduo insolúvel | 9,10 | ≤ 3,5% |

Com base nos resultados da Tabela 19 é possível verificar que o cimento Portland atende as exigências químicas, com exceção do resíduo insolúvel. Provavelmente por se tratar de um cimento Portland do tipo V-ARI, resistente a sulfatos (CP V ARI RS). Nesse caso não há limitações para o resíduo insolúvel e óxido de magnésio.

4.1.2 Cinza volante

A cinza volante empregada no estudo é proveniente da queima de carvão mineral. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) deve atender aos requisitos para a Classe “C” de materiais pozolânicos.

A cinza volante empregada foi submetida à caracterização física, conforme a NBR 12826 (ABNT, 2014), NBR 16372 (ABNT, 2015) e NBR 16605 (ABNT, 2017). Os resultados estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Índices físicos cinza volante

| Caracterização física | | | | Requisitos (NBR 12653:2014) |
|--------------------------------|------------------------------|--------|-------|--------------------------------|
| Finura | Resíduo retido na peneira | n° 200 | 12,7% | - |
| | | n° 325 | 24,0% | < 20% |
| Superfície específica “Blaine” | 3840 cm ² /g | | | - |
| Massa específica absoluta | 2,16 g/cm ³ | | | - |

Com base na NBR 12653 (ABNT, 2014), a cinza volante não atende ao requisito físico, avaliado através do resíduo retido na peneira de abertura de malha 45µm (ASTM 325). Isso ocorre devido à cinza volante não ter sido beneficiada, ou seja, moída.

A cinza foi observada em microscópio eletrônico de varredura por elétrons secundários (MEV), com a finalidade de verificar a morfologia (esférica) e a textura dos grãos (lisa), conforme apresentado na Figura 68. A observação foi realizada no Laboratório Central de Microscopia e Microanálise (LabCEMM) da PUCRS.

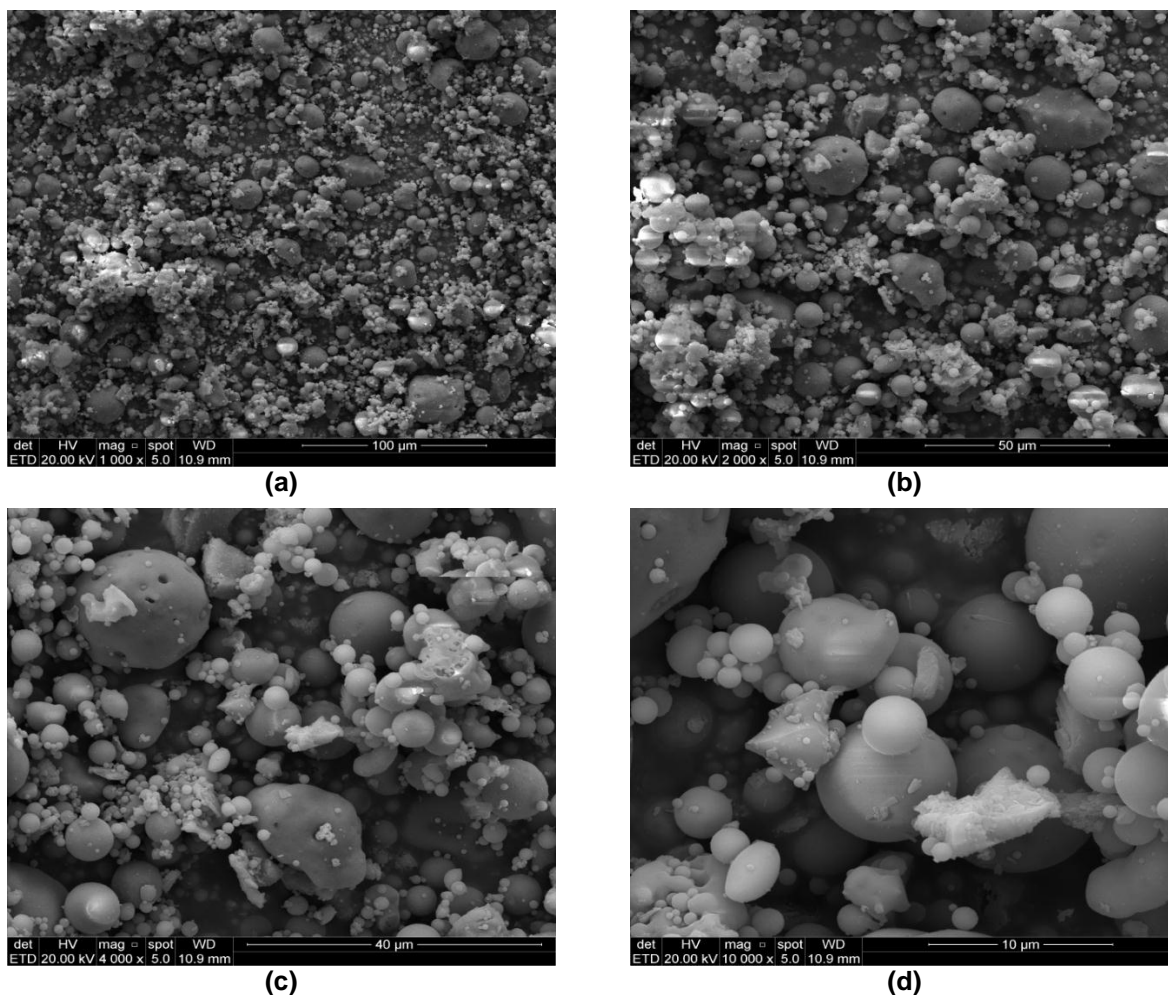


Figura 68 – MEV por elétrons secundários da cinza utilizada com aumentos de: (a) 1.000 vezes, (b) 2.000 vezes, (c) 4.000 vezes e (d) 10.000 vezes

A distribuição granulométrica dos grãos de cinza e a superfície específica BET foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Diâmetro e superfície específica BET da cinza

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| Diâmetro a 10% | 2,26 μm |
| Diâmetro a 50% | 21,31 μm |
| Diâmetro a 90% | 77,02 μm |
| Diâmetro médio | 32,74 μm |
| Área superficial BET | 3.934 m^2/g |

A análise química da cinza foi conduzida segundo a NBR NM 18 (ABNT, 2012) e NBR NM 22 (ABNT, 2012) e por Fluorescência de Raios – X (FRX), estando a composição determinada apresentada na Tabela 22. A análise foi realizada no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS.

Tabela 22 – Composição química quantitativa da cinza

| Determinação | % em massa | Requisitos (NBR 12653, 2014) |
|--|------------|---------------------------------|
| Óxido de silício (SiO ₂) | 49,03 | - |
| Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) | 26,55 | - |
| Óxido de cálcio (CaO) | 11,75 | - |
| Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃) | 4,22 | - |
| Óxido de potássio (K ₂ O) | 2,38 | - |
| Óxido de titânio (TiO ₂) | 2,20 | - |
| Óxido de magnésio (MgO) | 0,25 | - |
| Óxido de enxofre (SO ₃) | 1,36 | - |
| Perda ao fogo (1000°C) | 1,40 | ≤ 6% |
| SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ | 79,8 | ≥ 70% |

A partir da Tabela 22 é possível verificar que a cinza volante utilizada no estudo atende aos requisitos de perda ao fogo e teor de óxidos (silício, ferro e alumínio) de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014).

A Figura 69 apresenta o difratograma qualitativo da cinza volante utilizada. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análises Inorgânicas (LAI) da CIENTEC, com a utilização de um difratômetro de raio – X, marca RIGAKU, sistema D/MAX – 2100, com goniômetro última+theta-theta e detector de cintilação de NaI(Tl).

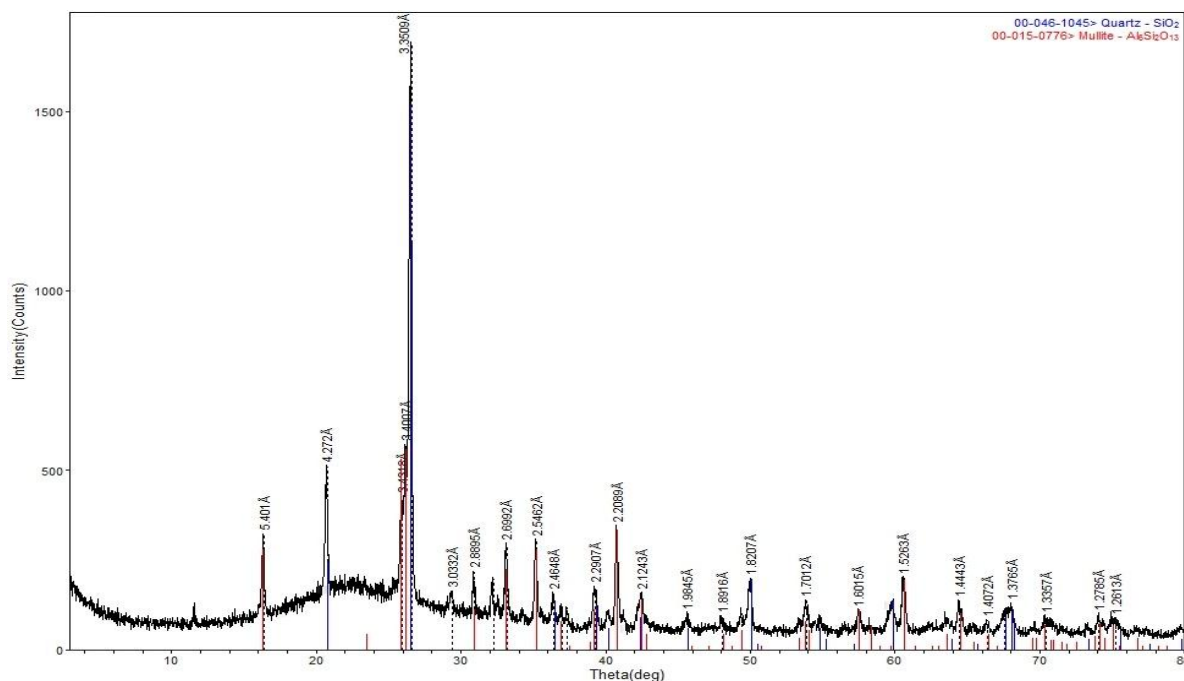


Figura 69 – Difratoograma obtido da análise da cinza volante

Com base no difratograma é possível verificar fases cristalinas e a presença de região (halo) amorfa. A análise foi realizada numa varredura angular de 0° a 80° , levando em consideração as seguintes condições de ensaio:

- tubo de raio $-X$ com ânodo de cobre e radiação $CuK\alpha$;
- tensão de 40kV e corrente aplicada de 20mA;
- velocidade de varredura de $2^{\circ}/\text{min}$ e intervalo de leitura de $0,020^{\circ}$.

Ainda, para a adição mineral utilizada no estudo foram realizados os ensaios de atividade pozolânica com cal e cimento, seguindo respectivamente a NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014). Os resultados estão apresentados nas Tabelas 23 e 24.

Tabela 23 – Atividade pozolânica com cal

| Resistência à compressão aos 7 dias (MPa) | | | | | Desvio relativo máximo (%) | Índice de consistência da argamassa (mm) |
|---|--------|--------|--------|-------|----------------------------|--|
| C.P. 1 | C.P. 2 | C.P. 3 | C.P. 4 | Média | | |
| 7,8 | 7,7 | 7,7 | 7,9 | 7,8 | 1,3 | 225 |

Tabela 24 – Atividade pozolânica com cimento

| Amostra | Resistência à compressão aos 28 dias (MPa) | | | | | Desvio relativo máximo (%) | Índice de consistência da argamassa (mm) | Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (%) |
|-------------------------------|--|--------|--------|--------|-------|----------------------------|--|---|
| | C.P. 1 | C.P. 2 | C.P. 3 | C.P. 4 | Média | | | |
| Cimento Portland (referência) | 39,9 | 38,1 | 38,8 | 37,5 | 38,6 | 3,4 | 211 | - |
| Cinza volante | 37,9 | 39,9 | 37,6 | 39,0 | 38,6 | 3,4 | 207 | 100 |

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014) são considerados pozolânicos os materiais que apresentam índice de atividade pozolânica com cimento Portland, aos 28 dias, igual ou superior a 90% e os que apresentam índice de atividade pozolânica com cal, aos 7 dias, igual ou superior a 6,0 MPa.

4.1.3 Agregados

Os agregados utilizados no presente estudo foram submetidos a ensaios para determinação da composição granulométrica, massa específica absoluta, massa unitária e material passante na peneira 75 μm (ASTM 200), por lavagem. A composição granulométrica foi determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), por meio de peneiramento com o auxílio de agitador mecânico. Os resultados são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Composição granulométrica: areia natural e basalto

| Peneiras (mm) | Massa retida (kg) | | % em massa | | | |
|--------------------------------|-------------------|---------|------------|---------|-----------|---------|
| | | | Retida | | Acumulada | |
| | Areia | Basalto | Areia | Basalto | Areia | Basalto |
| 19 | - | 0 | - | 0 | - | 0 |
| 12,5 | - | 3,858 | - | 39 | - | 39- |
| 9,5 | - | 4,154 | - | 42 | - | 81 |
| 6,3 | - | 1,632 | - | 16 | - | 97- |
| 4,75 | 0,002 | - | 0 | - | 0 | 97 |
| 2,36 | 0,011 | - | 1 | - | 1 | 97 |
| 1,18 | 0,102 | - | 10 | - | 11 | 97 |
| 600 μm | 0,285 | - | 28 | - | 39 | 97 |
| 300 μm | 0,395 | - | 40 | - | 79 | 97 |
| 150 μm | 0,175 | - | 18 | - | 97 | 97 |
| Fundo | 0,030 | 0,336 | 3 | 3 | 100- | 100- |
| TOTAL | 1,000 | 9,980 | 100 | 100 | 227 | 663 |
| Módulo de finura | | | | | 2,27 | 6,63 |
| Dimensão máxima característica | | | | | 2,36 mm | 19 mm |

Para os agregados graúdos identificados como granito e diabásio não foi realizada a determinação da composição granulométrica, pois a fase de estudo

referente a esses agregados utiliza a granulometria constituída por frações individuais e quantidades pré-fixadas.

As determinações de massa específica absoluta, massa unitária e material pulverulento foram realizadas, respectivamente, pelo método do picnômetro, NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 46 (ABNT, 2003). O ensaio de massa unitária foi realizado com o material no estado solto. Já o teor de material pulverulento foi determinado sem o auxílio de agente umectante dissolvido em água para dispersar o material fino. Os resultados da caracterização física dos agregados constam na Tabela 26.

Tabela 26 – Massa específica absoluta, massa unitária e material pulverulento

| Agregado | Massa específica absoluta (g/cm ³) | Massa unitária (g/cm ³) | Material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem (%) |
|----------|--|-------------------------------------|--|
| Basalto | 2,80 | 1,53 | 2,5 |
| Granito | 2,62 | 1,32 | 1,0 |
| Diabásio | 3,11 | 1,66 | 0,2 |
| Areia | 2,64 | 1,60 | 0,9 |

A determinação do teor de impurezas orgânicas presentes no agregado miúdo (areia) foi realizada de acordo com a NBR NM 49 (ABNT, 2001) e apresentou ao final do ensaio uma coloração mais clara que a solução padrão.

Os diferentes agregados graúdos foram submetidos, através de testemunhos extraídos das rochas matriz, aos ensaios de resistência à compressão e módulo de deformação de acordo com o procedimento descrito na NBR 10341 (ABNT, 2006). A caracterização consta na Tabela 27.

Tabela 27 – Resistência à compressão e módulo de deformação das rochas

| Tipo de Agregado Graúdo | Resistência à compressão média - f_{cm} (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef} / f_c$ |
|-------------------------|---|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|--------------------------|
| | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| Granito | 129,0 | 97,7 | 92,8 | 91,9 | 91,5 | 91,0 | 90,5 | 90,2 | 136,5 | 1,06 |
| | | 98,7 | 94,7 | 92,1 | 91,5 | 91,1 | 89,5 | 89,2 | 128,2 | 0,99 |
| | | 97,7 | 96,7 | 94,8 | 91,1 | 89,5 | 87,8 | 86,1 | 135,4 | 1,05 |
| | E_{cs} (médio) | 98,0 | 94,7 | 92,9 | 91,4 | 90,5 | 89,3 | 88,5 | - | |
| | D.P (GPa) | 0,58 | 1,95 | 1,62 | 0,23 | 0,90 | 1,37 | 2,14 | | |
| | CV (%) | 0,59 | 2,06 | 1,74 | 0,25 | 0,99 | 1,53 | 2,42 | | |
| Basalto | 131,7 | 117,3 | 114,5 | 109,8 | 102,6 | 101,2 | 98,8 | 95,0 | 142,1 | 1,08 |
| | | 121,9 | 116,3 | 109,5 | 104,1 | 102,1 | 100,2 | 97,4 | 132,4 | 1,01 |
| | | 113,7 | 113,5 | 110,1 | 107,5 | 105,2 | 103,4 | 102,7 | 114,9 | 0,88 |
| | E_{cs} (médio) | 117,6 | 114,8 | 109,8 | 104,7 | 102,8 | 100,8 | 98,4 | - | |
| | D.P (GPa) | 4,11 | 1,42 | 0,30 | 2,51 | 2,10 | 2,36 | 3,94 | | |
| | CV (%) | 3,49 | 1,24 | 0,27 | 2,40 | 2,04 | 2,34 | 4,01 | | |
| Diabásio | 174,9 | 199,4 | 198,1 | 198,0 | 195,6 | 194,1 | 192,8 | 192,7 | 176,5 | 1,01 |
| | | 192,1 | 191,8 | 189,9 | 186,4 | 184,5 | 180,0 | 175,5 | 189,6 | 1,08 |
| | | 195,6 | 192,1 | 185,8 | 181,9 | 178,1 | 175,7 | 173,2 | 197,1 | 1,13 |
| | E_{cs} (médio) | 195,7 | 194,0 | 191,2 | 188,0 | 185,6 | 182,8 | 180,5 | - | |
| | D.P (GPa) | 3,65 | 3,55 | 6,21 | 6,98 | 8,05 | 8,90 | 10,6 | | |
| | CV (%) | 1,87 | 1,83 | 3,25 | 3,72 | 4,34 | 4,87 | 5,91 | | |

Diante dos resultados de módulo de deformação das rochas é possível verificar que os três (03) agregados graúdos possuem comportamentos distintos. Merece destacar a diferença nítida do módulo de deformação apresentado pelo diabásio em comparação ao granito e basalto.

Ainda, embora o basalto e o granito apresentem resistência à compressão similares, as características de rigidez das rochas são distintas.

4.2 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A moldagem de todos os corpos de prova foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC).

Todos os concretos foram produzidos em um mesmo misturador de eixo vertical, em laboratório, e pela mesma equipe.

A reprodução de cada traço de concreto levou em conta a homogeneização visual e de um tempo de mistura de aproximadamente cinco (05) minutos, a partir da colocação total da água. Quando necessário foi empregado o aditivo

superplastificante, após o processo de mistura com água estar concluído, sendo estendido o tempo para a perfeita incorporação do aditivo à mistura.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada conforme as orientações prescritas na NBR 5738 (ABNT, 2015), sendo adotada a dimensão de (10x20) cm. A adoção dessa dimensão de corpos de prova cilíndricos deve-se ao fato de ser este o padrão verificado atualmente, através dos Programas Interlaboratoriais de Concreto.

Para cada idade estudada foi realizada a moldagem de cinco (05) corpos de prova, conforme preconiza a NBR 8522 (ABNT, 2017).

Após a cura inicial de 24 horas no ambiente do laboratório, as amostras foram armazenadas em câmara úmida, com temperatura ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar controlada ($U.R \geq 95\%$), de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006).

Entretanto, as amostras destinadas ao estudo da cura a vapor, após a moldagem, foram transportadas até uma indústria de pré-moldados de concreto. As condições de cura seguiram o procedimento consolidado e utilizado pela empresa, sendo submetidas às seguintes condições:

- a) concreto fresco permanece nos moldes por um período aproximado de 2 horas, em temperatura ambiente ($\approx 23^{\circ}\text{C}$);
- b) posteriormente, inicia-se a elevação da temperatura até 60°C num tempo máximo de 1h30min;
- c) concreto permanece por um período de 6 horas na temperatura de 60°C ;
- d) por fim, realiza-se o resfriamento progressivo até a temperatura ambiente num tempo de aproximadamente 1h.

Findado o processo, as amostras retornaram ao laboratório e foram armazenadas em câmara úmida, conforme a NBR 9479 (ABNT, 2006), até o momento do ensaio.

4.3 ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO

Todos os ensaios do programa experimental foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC).

Nos itens a seguir serão descritos os ensaios executados sobre o concreto fresco e endurecido.

4.3.1 Abatimento pelo tronco de cone

Com os concretos produzidos foi realizada a verificação do abatimento pelo tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Salienta-se que esta verificação foi realizada para todos os traços reproduzidos pelo mesmo operador.

4.3.2 Resistência à compressão

A preparação dos corpos de prova para este ensaio, consistiu de retificação para permitir o paralelismo entre as bases e a ortogonalidade em relação ao eixo longitudinal e posteriormente foi concluído pela execução de capeamento com argamassa com traço 1:1, em massa, respectivamente cimento Portland tipo V-ARI e areia natural quartzosa peneirada, em peneira de abertura de malha nominal de 1,18mm, procedimento esse utilizado pelo LMCC da CIENTEC.

O equipamento de compressão que foi utilizado é de classe 1, conforme os critérios estabelecidos pela NBR ISO 7500-1 (ABNT, 2016), tendo capacidade nominal de 2000kN, com acionamento elétrico e escala digital. O equipamento é calibrado anualmente conforme requisito da NBR 5739 (ABNT, 2018).

De acordo com a NBR 12655 (ABNT, 2015), a resistência à compressão do concreto é verificada com base no ensaio de um exemplar – conjunto de dois corpos de prova, para cada idade de ensaio. A determinação da resistência à compressão foi realizada conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018) para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias. Este valor foi tomado como referência para estabelecimento do plano de carregamento para o ensaio de módulo de deformação do concreto.

4.3.3 Módulo de deformação do concreto

A determinação do módulo de deformação do concreto foi realizada conforme o procedimento descrito na NBR 8522 (ABNT, 2017), em cada idade de ensaio.

Os medidores de deslocamento utilizados na verificação das deformações são do tipo elétrico de fixação externa (*clip gages*), sendo adotada uma base de medida

de 74,9 mm. A razão para a escolha do medidor de deformação está ligada às constatações verificadas no referencial teórico, onde esse tipo de instrumentação é o que resulta em menores variabilidades de leitura.

O cálculo do módulo de deformação do concreto é realizado de acordo com a equação a seguir.

$$E_{cs} = \left(\frac{\sigma_n - \sigma_a}{\varepsilon_n - \varepsilon_a} \right) \times 10^{-3}$$

Onde:

E_{cs} : é o módulo de deformação secante (GPa);

σ_n : tensão à compressão, variável de 20 a 80% do carregamento (MPa);

σ_a : tensão à compressão, inicial de 0,5 MPa;

ε_n : deformação específica, referente à σ_n ;

ε_a : deformação específica, referente à σ_a .

4.4 PRIMEIRA FASE

Foi produzido um trabalho preliminar para verificação da real possibilidade de identificação das variáveis intervenientes no processo e para delinear melhor a segunda fase do programa experimental. A reprodução dessa avaliação, levou em conta uma amostra de materiais, diferentes daquela utilizada na segunda fase do programa experimental, embora de mesmo tipo e origem.

Essa reprodução consistiu da escolha de quatro (04) parâmetros de dosagem, sendo todos os ensaios de módulo de deformação realizados na idade de 28 dias. Assim o trabalho preliminar foi desenvolvido para as seguintes variáveis:

- a) o volume de pasta;
- b) a resistência à compressão;
- c) o teor de argamassa;
- d) o tipo do agregado graúdo.

Os traços reproduzidos para cada parâmetro de dosagem estudado preliminarmente estão apresentados nos respectivos subitens, já os resultados completos dos ensaios constam nos Apêndices identificados de A a D.

Salienta-se que os resultados apresentados nos itens a seguir representam o valor médio, desvio-padrão e coeficiente de variação do módulo de deformação, referente ao carregamento de 30% da resistência à compressão média.

4.4.1 Volume de Pasta

Para o estudo do volume de pasta foram empregados traços diferentes para a produção de concretos em que fosse utilizada a mesma relação água/cimento de maneira a ser verificada a mesma resistência, sendo, portanto, a única variável o volume de pasta. O teor de argamassa foi fixado em 54% para todos os traços.

Os traços reproduzidos estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Traços reproduzidos: volume de pasta

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | |
|-------------------------------------|------------------|--------|-------|-------|-------|
| | 1:3,0 | 1:3,75 | 1:4,5 | 1:5,0 | 1:6,0 |
| Cimento Portland | 1,00 | | | | |
| Agregado miúdo | 1,16 | 1,57 | 1,97 | 2,24 | 2,78 |
| Agregado graúdo (Basalto) | 1,84 | 2,18 | 2,53 | 2,76 | 3,22 |
| Relação a/c | 0,408 | | | | |
| Aditivo superplastificante (%) | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,8 |
| Teor de Argamassa (%) | 54 | | | | |
| Teor de água/materiais secos (%) | 10,2 | 8,59 | 7,42 | 6,80 | 5,83 |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | 140 | 150 | 210 | 215 | 175 |

A manutenção da relação água/cimento garantiu o atingimento de resistências à compressão similares, exceto para o traço mais fraco de menor volume de pasta o qual, provavelmente não foi suficiente para o completo preenchimento dos vazios deixados pela estrutura granular. Os resultados obtidos e os índices calculados estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados e índices calculados para o volume de pasta

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | |
|------------------------------------|------------------|--------|-------|-------|-------|
| | 1:3,0 | 1:3,75 | 1:4,5 | 1:5,0 | 1:6,0 |
| $C_{teórico}$ (kg/m ³) | 544 | 473 | 418 | 388 | 340 |
| Volume de pasta (%) | 40,3 | 35,0 | 31,0 | 28,8 | 25,1 |
| Volume de agregado (%) | 59,7 | 65,0 | 69,0 | 71,2 | 74,9 |
| Resistência à compressão (MPa) | 52,8 | 54,8 | 54,6 | 56,6 | 38,4 |
| $E_{cs, médio}$ (GPa) | 30,1 | 31,8 | 32,1 | 32,5 | 33,3 |
| D.P (GPa) | 0,97 | 0,45 | 0,67 | 1,25 | 1,04 |
| CV (%) | 3,22 | 1,42 | 2,09 | 3,85 | 3,12 |

Com base nos resultados de módulo de deformação obtidos, procedeu-se a análise de variância. Os resultados obtidos da análise estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Resultados da ANOVA para influência do volume de pasta

| Fator Estudado | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor "p" | Significância |
|-------------------|-------|-----|------|---------|-----------------|---------------|
| "Volume de Pasta" | 16,21 | 4 | 4,05 | 4,79 | 0,020374 | S |
| Erro | 8,47 | 10 | 0,85 | - | - | - |
| Total | 24,68 | 14 | - | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor "p" – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Os resultados apresentados na Tabela 30 mostram que o volume de pasta tem influência significativa sobre o módulo de deformação.

4.4.2 Resistência à Compressão

Na avaliação preliminar foi adotado o traço de referência (1:4,5) com teor de argamassa de 54%, em massa, alterando a qualidade do aglomerante de maneira a obter resistências à compressão diferentes e decrescentes, sem alterar os demais parâmetros de dosagem. Isso foi obtido pela substituição de cimento por cinza de maneira a manter constante a proporção do traço e o volume de pasta.

O volume de pasta foi mantido constante pelo emprego de uma mesma quantidade de água. Os traços reproduzidos estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Traços reproduzidos: resistência à compressão

| Parâmetro | Traço (em massa) | | |
|---|------------------|------|------|
| | Cimento Portland | 1,00 | |
| Cinza volante (substituição em volume) | 0 | 0,18 | 0,48 |
| | 0% | 20% | 40% |
| Agregado miúdo | 1,97 | 2,46 | 3,28 |
| Agregado graúdo (Basalto) | 2,53 | 3,16 | 4,22 |
| Relação água/cimento | 0,408 | 0,51 | 0,68 |
| Aditivo superplastificante (%) | 0,2 | | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | 210 | 230 | 230 |

A observação dos valores apresentados permite inferir não ter havido variação no abatimento pelo tronco de cone. Os resultados obtidos e os índices calculados estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Resultados e índices calculados para a resistência à compressão

| Parâmetro | Substituição por Cinza Volante (%) | | |
|------------------------------------|------------------------------------|------|------|
| | 0 | 20 | 40 |
| $C_{teórico}$ (kg/m ³) | 418 | 335 | 251 |
| Volume de pasta (%) | 31,0 | | |
| Volume de agregado (%) | 69,0 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | 54,6 | 46,5 | 35,1 |
| $E_{cs\ médio}$ (GPa) | 32,1 | 28,8 | 27,6 |
| D.P (GPa) | 0,67 | 3,75 | 3,04 |
| CV (%) | 2,09 | 13,0 | 11,0 |

O módulo de deformação obtido sobre o concreto produzido apenas com cimento acusa o valor mais elevado. Porém, a análise de variância indica não haver diferença significativa entre os resultados. Os resultados da análise de variância estão apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Resultados da ANOVA para influência da resistência à compressão

| Fator Estudado | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor "p" | Significância |
|----------------------------|--------|-----|--------|---------|-----------------|---------------|
| "Resistência à compressão" | 33,487 | 2 | 16,743 | 2,1170 | 0,201516 | NS |
| Erro | 47,453 | 6 | 7,909 | - | - | - |
| Total | 80,94 | 8 | - | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor "p" – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Os valores observados para o módulo correspondente à influência da resistência à compressão podem ser considerados iguais estatisticamente, muito provável pela variabilidade apresentada pelos resultados (substituição por 20% e 40% de cinza volante).

Diante dos resultados obtidos seria prudente reproduzir o ensaio, o que não foi feito por se tratar de uma avaliação preliminar.

4.4.3 Teor de Argamassa

Com o objetivo de avaliar a interferência da alteração do esqueleto granular da mistura sobre o módulo, principalmente pela alteração da relação agregado miúdo/agregado graúdo, foram produzidos concretos a partir do mesmo traço de referência, 1:4,50, em massa, calculado para diferentes teores de argamassa. As Tabelas 34 e 35 apresentam, respectivamente, os traços reproduzidos e os resultados obtidos no estudo.

Tabela 34 – Traços reproduzidos: teor de argamassa

| Parâmetro | Traço (em massa) | | |
|-------------------------------------|------------------|------|------|
| Cimento Portland | 1,00 | | |
| Teor de Argamassa (%) | 48 | 54 | 60 |
| Agregado miúdo | 1,64 | 1,97 | 2,30 |
| Agregado graúdo (Basalto) | 2,86 | 2,53 | 2,20 |
| Relação água/cimento | 0,408 | | |
| Aditivo superplastificante (%) | 0,2 | | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | 210 | 210 | 140 |

Tabela 35 - Resultados e índices calculados para o teor de argamassa

| Parâmetro | Teor de argamassa (%) | | |
|---|-----------------------|------|------|
| | 48 | 54 | 60 |
| $C_{\text{teórico}}$ (kg/m ³) | 420 | 418 | 417 |
| Volume de pasta (%) | 31,0 | | |
| Volume de agregado (%) | 69,0 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | 54,7 | 54,6 | 51,6 |
| $E_{\text{cs médio}}$ (GPa) | 32,4 | 32,1 | 31,5 |
| D.P (GPa) | 2,70 | 0,67 | 0,49 |
| CV (%) | 8,33 | 2,09 | 1,56 |

O que pode ser percebido pela análise dos valores obtidos é leve decréscimo do módulo em função do aumento do teor de argamassa. Entretanto a análise de variância (ANOVA) indica não haver diferença estatística entre os resultados obtidos para o módulo de deformação em função do teor de argamassa. Os resultados estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Resultados da ANOVA para teor de argamassa

| Fator Estudado | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor "p" | Significância |
|---------------------|--------|-----|-------|---------|-----------------|---------------|
| "Teor de Argamassa" | 1,260 | 2 | 0,630 | 0,237 | 0,796158 | NS |
| Erro | 15,960 | 6 | 2,660 | - | - | - |
| Total | 17,22 | 8 | - | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor "p" – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

De qualquer forma, a estrutura granular de um concreto pode ser importante na definição do módulo, embora a partir de grandes alterações na relação agregado miúdo/agregado graúdo, sugerindo assim a ampliação no número de traços a serem estudados.

4.4.4 Tipo de Agregado Graúdo

Por apresentarem diferentes massas específicas, a massa de agregado graúdo empregado em cada situação sofreu uma correção em função da massa específica de cada material, com a finalidade de garantir sempre a mesma proporção (traço) em volume para minimizar uma possível perturbação nas demais variáveis.

Em particular para esta variável de dosagem, visando garantir as mesmas condições, esses agregados foram lavados na peneira de abertura 75 μ m (ASTM 200) e peneirados para permitir a composição de um agregado de granulometria única. Nessa composição foram utilizadas porcentagens em massa de 40%, 30% e 30%, respectivamente, de grãos retidos nas peneiras de abertura quadrada de

12,5mm; 9,5mm e 6,3mm, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As Figuras 70, 71 e 72 ilustram os agregados graúdos utilizados no estudo.



Figura 70 – Brita de Granito



Figura 71 - Brita de Basalto



Figura 72 - Brita de Diabásio

As Tabelas 37 e 38 apresentam, respectivamente, os traços reproduzidos e os resultados obtidos no estudo.

Tabela 37 – Traços reproduzidos: tipo do agregado graúdo

| Parâmetro | Traço (em massa) | | |
|-------------------------------------|------------------|---------|----------|
| Cimento Portland | 1,00 | | |
| Agregado miúdo | 1,97 | | |
| Agregado graúdo (Tipo) | 2,37 | 2,53 | 2,81 |
| | Granito | Basalto | Diabásio |
| Relação água/cimento | 0,455 | | |
| Teor de Argamassa (%) | 54 | | |
| Aditivo superplastificante (%) | 0 | | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | 80 | 100 | 130 |

Tabela 38 - Resultados e índices calculados para o tipo do agregado graúdo

| Parâmetro | Tipo do Agregado Graúdo | | |
|---|-------------------------|---------|----------|
| | Granito | Basalto | Diabásio |
| $C_{\text{teórico}}$ (kg/m ³) | 410 | | |
| Volume de pasta (%) | 32,3 | | |
| Volume de agregado (%) | 67,7 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | 41,7 | 41,3 | 42,6 |
| $E_{\text{cs médio}}$ (GPa) | 25,0 | 33,6 | 39,6 |
| D.P (GPa) | 0,53 | 0,75 | 1,41 |
| CV (%) | 2,12 | 2,23 | 3,56 |

O que pode ser depreendido a partir de uma análise simples é que a natureza do agregado representa uma variável importante na definição do módulo, fato comprovado pela análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise estão apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Resultados da ANOVA para o tipo do agregado graúdo no módulo de deformação

| Fator Estudado | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor "p" | Significância |
|---------------------------|---------|-----|---------|---------|-----------------|---------------|
| "Tipo do Agregado Graúdo" | 323,296 | 2 | 161,648 | 171,16 | 0,000005 | S |
| Erro | 5,667 | 6 | 0,944 | - | - | - |
| Total | 328,963 | 8 | - | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor "p" – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

A análise de variância (Tabela 39) indica que há diferença estatística entre os valores do módulo de deformação, quando considerados os diferentes tipos de agregado graúdo.

4.5 SEGUNDA FASE

Diante das constatações verificadas na primeira fase foi delineado a execução da segunda fase do programa experimental, considerando os parâmetros de dosagem já reproduzidos e acrescentando a idade e o tipo de cura. Vale ressaltar que embora as constatações verificadas no item 4.4, acerca da resistência à compressão e do teor de argamassa não exerceram influência significativa sobre o resultado de módulo de deformação, a proposta aqui apresentada parte da reprodução de maior quantidade de traços para essas variáveis, a fim de constatar o comportamento frente as novas proporções.

Nos itens a seguir serão apresentados os traços reproduzidos nesta etapa do trabalho.

4.5.1 Volume de Pasta

Para a discretização do parâmetro volume de pasta foram calculados traços em massa a partir de um mesmo teor de argamassa, que foram reproduzidos a partir da fixação da relação água/cimento.

A partir da fixação da relação água/cimento é possível esperar valores de resistência à compressão de mesma ordem de grandeza. Dessa forma é garantida a variação entre o volume de agregado e o volume de pasta.

O teor de argamassa definido foi de 54%, obtido pela metodologia proposta por Recena (2011), através do método “Alemão Simplificado”.

No estudo dessa variável foram utilizados seis (06) traços, em massa, a fim de reproduzir uma curva de Abrams. A relação de traços, bem como as proporções referente a essa variável de dosagem estão apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 – Volume de Pasta: traços reproduzidos

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|
| | 1:2 | 1:3 | 1:4 | 1:5 | 1:6 | 1:7 |
| Cimento Portland | 1,00 | | | | | |
| Agregado miúdo | 0,62 | 1,16 | 1,70 | 2,24 | 2,78 | 3,32 |
| Agregado graúdo (Basalto) | 1,38 | 1,84 | 2,30 | 2,76 | 3,22 | 3,68 |
| Relação a/c | 0,409 | | | | | |
| Aditivo superplastificante (%) | - | - | 0,13 | 0,27 | 0,73 | 1,1 |
| Teor de Argamassa (%) | 54 | | | | | |
| Teor de água/materiais secos (%) | 13,6 | 10,2 | 8,18 | 6,82 | 5,84 | 5,11 |

Para cada traço reproduzido foram moldados quinze (15) corpos de prova cilíndricos com dimensão (10 x 20) cm, a serem ensaiados aos 14 dias, 28 dias e 150 dias de idade.

4.5.2 Resistência à Compressão

Para a consecução do objetivo proposto, com base nos traços definidos, foi alterado o rendimento do aglomerante de maneira a se obterem resistências à compressão diferentes e decrescentes, sem alterar o volume de pasta e a estrutura granular pela substituição de cimento por cinza. Sendo necessária a manutenção do volume de aglomerante constante.

O procedimento foi baseado na tese apresentada por Recena (2011), na qual é realizada a correção do volume de cinza adicionado em função da massa específica absoluta da cinza de maneira a manter o mesmo volume de pasta.

O volume de pasta foi mantido constante pelo emprego de uma mesma quantidade de água.

O teor de argamassa foi fixado em 54%, em massa.

No estudo foram utilizados três (03) traços em massa, a fim de reproduzir uma curva de Abrams. Os traços reproduzidos estão apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 – Resistência à compressão: traços reproduzidos

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| | 1:3 | | | | 1:5 | | | | 1:7 | | | |
| Cimento Portland | 1,00 | | | | 1,00 | | | | 1,00 | | | |
| Cinza volante (substituição em volume) | 0 | 0,18 | 0,47 | 1,06 | 0 | 0,18 | 0,47 | 1,06 | 0 | 0,18 | 0,47 | 1,06 |
| | 0% | 20% | 40% | 60% | 0% | 20% | 40% | 60% | 0% | 20% | 40% | 60% |
| Agregado miúdo | 1,16 | 1,45 | 1,93 | 2,90 | 2,24 | 2,80 | 3,73 | 5,60 | 3,32 | 4,15 | 5,53 | 8,30 |
| Agregado graúdo (Basalto) | 1,84 | 2,30 | 3,07 | 4,60 | 2,76 | 3,45 | 4,60 | 6,90 | 3,68 | 4,60 | 6,13 | 9,20 |
| Relação água/cimento | 0,409 | 0,511 | 0,682 | 1,02 | 0,409 | 0,511 | 0,682 | 1,02 | 0,409 | 0,511 | 0,682 | 1,02 |
| Aditivo superplastificante (%) | - | | | | 0,27 | 0,34 | 0,37 | 0,57 | 1,1 | 1,6 | 2,1 | 3,1 |
| Teor de Argamassa (%) | 54 | | | | | | | | | | | |
| Teor de água/materiais secos (%) | 10,2 | | | | 6,82 | | | | 5,11 | | | |

Para cada traço reproduzido foram moldados quinze (15) corpos de prova cilíndricos com dimensão (10 x 20) cm, ensaiados nas idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias.

4.5.3 Teor de Argamassa

A avaliação da influência dessa variável partiu da fixação de teor de argamassa central, o qual foi obtido pela metodologia proposta por Recena (2011). O teor de argamassa ideal obtido foi de 54%, em massa. Esse teor de argamassa situa-se dentro dos limites usuais, entre 48% e 55%, em massa, conforme definido por Recena (2011).

No estudo foram utilizados três (03) traços em massa, a fim de reproduzir uma curva de Abrams. Com isso, mantido fixo o volume de pasta, bem como a relação água/cimento. Procedeu-se a variação do teor de argamassa, atribuindo-se três (03) valores: 48%, 54% e 60%, em massa.

A Tabela 42 apresenta a composição e parâmetros dos traços reproduzidos no estudo.

Tabela 42 – Teor de Argamassa: traços reproduzidos

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1:3 | | | 1:5 | | | 1:7 | | |
| Cimento Portland | 1,00 | | | 1,00 | | | 1,00 | | |
| Teor de Argamassa (%) | 48 | 54 | 60 | 48 | 54 | 60 | 48 | 54 | 60 |
| Agregado miúdo | 0,92 | 1,16 | 1,40 | 1,88 | 2,24 | 2,60 | 2,84 | 3,32 | 3,80 |
| Agregado graúdo (Basalto) | 2,08 | 1,84 | 1,60 | 3,12 | 2,76 | 2,40 | 4,16 | 3,68 | 3,20 |
| Relação água/cimento | 0,409 | | | | | | | | |
| Aditivo superplastificante (%) | - | | | 0,24 | 0,27 | 0,50 | 0,83 | 1,1 | 2,42 |
| Teor de água/materiais secos (%) | 10,2 | | | 6,82 | | | 5,11 | | |

Para cada traço reproduzido foram moldados quinze (15) corpos de prova cilíndricos com dimensão (10 x 20) cm, ensaiados nas idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias.

4.5.4 Tipo de Agregado Graúdo

Para a análise da influência de cada tipo de agregado graúdo foram utilizados três (03) traços em massa, a fim de reproduzir uma curva de Abrams.

Por apresentarem diferentes massas específicas absolutas, o volume de agregado graúdo foi corrigido, com a finalidade de garantir sempre o mesmo volume absoluto de agregado graúdo na mistura.

Portanto foram reproduzidos traços iguais em volume, para manter o mesmo consumo de cimento e relação água/cimento.

Conforme já destacado na avaliação preliminar, ressalta-se que para o estudo desta variável, todos os agregados graúdos foram lavados em peneira de abertura nominal 75 µm e a composição granulométrica foi constituída com base nas porcentagens, em massa, de 40%, 30% e 30%, respectivamente, de grãos retidos nas peneiras de abertura quadrada de 12,5mm; 9,5mm e 6,3mm. Esse procedimento visa manter a distribuição granulométrica e dimensão máxima característica iguais para todos os agregados.

O teor de argamassa utilizado foi de 54%, em massa, conforme descrito nos itens anteriores. A relação água/cimento (resistência à compressão), bem como o

volume de pasta foram mantidos constantes para cada traço em estudo, independente do tipo de agregado graúdo.

A Tabela 43 apresenta a composição e parâmetros dos traços reproduzidos no estudo.

Tabela 43 – Tipo de Agregado Graúdo: traços reproduzidos

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | | | | | |
|----------------------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | 1:3 | | | 1:5 | | | 1:7 | | |
| Cimento Portland | 1,00 | | | 1,00 | | | 1,00 | | |
| Agregado miúdo | 1,16 | | | 2,24 | | | 3,32 | | |
| Tipo de Agregado | 1,76 | 1,84 | 2,09 | 2,64 | 2,76 | 3,13 | 3,52 | 3,68 | 4,18 |
| | <i>Granito</i> | <i>Basalto</i> | <i>Diabásio</i> | <i>Granito</i> | <i>Basalto</i> | <i>Diabásio</i> | <i>Granito</i> | <i>Basalto</i> | <i>Diabásio</i> |
| Relação água/cimento | 0,409 | | | | | | | | |
| Aditivo superplastificante (%) | - | | | 0,27 | | | 1,1 | | |
| Teor de Argamassa (%) | 54 | | | | | | | | |
| Teor de água/materiais secos (%) | 10,4 | 10,2 | 9,62 | 6,96 | 6,82 | 6,42 | 5,22 | 5,11 | 4,81 |

Para cada traço reproduzido foram moldados quinze (15) corpos de prova cilíndricos com dimensão (10 x 20) cm, ensaiados aos 14 dias, 28 dias e 150 dias de idade.

4.5.5 Tipo de Cura

Para o estudo do tipo de cura foram utilizados corpos de prova curados segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015), via processo úmido ($U.R \geq 95\%$) e temperatura controlada ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) e submetidos ao ciclo industrial de cura a vapor, conforme descrito no item 4.2.

Para a análise da influência do tipo de cura (úmida e vapor) foram utilizados três (03) traços, em massa, a fim de reproduzir uma curva de Abrams. Já, os demais parâmetros de dosagem foram fixados: relação água/cimento, volume de pasta e volume de agregado, teor de argamassa e tipo de agregado graúdo. A Tabela 44 apresenta a composição e os parâmetros dos traços reproduzidos no estudo.

Tabela 44 – Tipo de Cura: traços produzidos

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | | |
|----------------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1:3 | | 1:5 | | 1:7 | |
| Cimento Portland | 1,00 | | | | | |
| Agregado miúdo | 1,16 | | 2,24 | | 3,32 | |
| Agregado graúdo (Basalto) | 1,84 | | 2,76 | | 3,68 | |
| Relação água/cimento | 0,409 | | | | | |
| Aditivo superplastificante (%) | - | | 0,27 | | 1,1 | |
| Tipo de cura | Úmida | Vapor | Úmida | Vapor | Úmida | Vapor |
| Teor de Argamassa (%) | 54 | | | | | |
| Teor de água/materiais secos (%) | 10,2 | | 6,82 | | 5,11 | |

Para cada traço reproduzido foram moldados quinze (15) corpos de prova cilíndricos com dimensão (10 x 20) cm, ensaiados nas idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da execução da segunda fase do programa experimental desenvolvido com os materiais e métodos apresentados no capítulo 4. A discussão dos dados obtidos, revelam o comportamento na variável de resposta (módulo de deformação), condicionado às condições específicas estabelecidas pelo presente programa experimental com relação aos materiais, traços, condições de cura e idade de ensaio.

A interpretação estatística dos resultados foi realizada com base na análise de variância (ANOVA) e pelo agrupamento de médias homogêneas (Teste de Duncan), quando necessário, sempre sendo considerado o nível de confiança de 95%.

As equações de regressão apresentadas permitem observar o comportamento da variável estudada em cada evento, apoiadas pelo coeficiente de correlação, tomado como indicador da aderência entre o comportamento e às premissas conceituais.

Para efeito de comparação com a NBR 6118 (ABNT, 2014) foi determinada a resistência característica à compressão (f_{ck}) para cada traço, a partir da resistência média à compressão (f_{cm}), adotando-se o desvio-padrão de 4 MPa de acordo com as considerações da NBR 12655 (ABNT, 2015).

Os resultados dos ensaios de módulo de deformação constam nos Apêndices identificados de E a I.

5.1 VOLUME DE PASTA

Os resultados referentes à resistência à compressão e módulo de deformação para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias, juntamente com os índices determinados, estão apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 – Volume de Pasta: resultados obtidos

| Traço (em massa) | | 1:2 | 1:3 | 1:4 | 1:5 | 1:6 | 1:7 | |
|--|---------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Consumo de cimento (kg/m ³) | | 689 | 551 | 459 | 393 | 344 | 305 | |
| Volume de pasta (%) | | 50,2 | 40,1 | 33,4 | 28,6 | 25,0 | 22,3 | |
| Volume de agregado (%) | | 49,8 | 59,9 | 66,6 | 71,4 | 75,0 | 77,7 | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | | 200 | 135 | 150 | 190 | 150 | 75 | |
| Resistência à compressão (MPa) | 14 dias | 49,2 | 50,5 | 48,5 | 49,4 | 50,6 | 47,3 | |
| | 28 dias | 56,3 | 58,0 | 55,3 | 56,7 | 58,8 | 52,8 | |
| | 150 dias | 69,4 | 68,6 | 66,2 | 69,1 | 68,9 | 63,9 | |
| Módulo de deformação (GPa) | 14 dias | E _{cs, médio} | 30,8 | 33,7 | 35,7 | 38,7 | 39,2 | 40,2 |
| | | D.P. (GPa) | 2,03 | 2,66 | 2,26 | 0,61 | 1,39 | 0,68 |
| | | CV (%) | 6,58 | 7,90 | 6,33 | 1,58 | 3,55 | 1,69 |
| | 28 dias | E _{cs, médio} | 31,6 | 36,0 | 37,1 | 39,1 | 41,0 | 42,2 |
| | | D.P. (GPa) | 1,05 | 0,29 | 0,82 | 0,67 | 0,53 | 0,75 |
| | | CV (%) | 3,33 | 0,81 | 2,21 | 1,71 | 1,29 | 1,78 |
| | 150 dias | E _{cs, médio} | 33,3 | 36,2 | 38,1 | 40,8 | 41,3 | 42,9 |
| | | D.P. (GPa) | 0,65 | 0,93 | 3,98 | 1,07 | 1,34 | 2,43 |
| | | CV (%) | 1,95 | 2,57 | 10,4 | 2,62 | 3,25 | 5,66 |
| Taxa de Crescimento do E _{cs} (%) | 14 – 28 dias | 2,38 | 6,83 | 3,92 | 1,12 | 4,59 | 4,98 | |
| | Média | 3,97 | | | | | | |
| | 14 – 150 dias | 8,11 | 7,62 | 6,82 | 5,51 | 5,27 | 6,89 | |
| | Média | 6,70 | | | | | | |
| | 28 – 150 dias | 5,60 | 0,74 | 2,79 | 4,34 | 0,65 | 1,82 | |
| Média | 2,66 | | | | | | | |

Na Tabela 45, é possível verificar que à medida em que o volume de pasta aumenta, o teor de agregado na mistura reduz, provocando a redução da matriz granular. É possível associar a elevação do valor do módulo de deformação ao aumento da quantidade do componente de maior rigidez, o agregado.

A resistência à compressão permanece na mesma faixa de variação para a mesma idade em todos os casos. Ainda, a resistência à compressão apresenta maior crescimento entre as idades, quando comparada ao módulo de deformação do concreto.

No traço com menor quantidade de aglomerante (1:7) é verificado leve declínio na resistência à compressão, provavelmente pela baixa quantidade de pasta na mistura, a qual não é suficiente para o total envolvimento/preenchimento da estrutura granular dos agregados, o que determina a influência na porosidade do aglomerado.

A observação dos valores apresentados na mesma Tabela 45 permite confirmar a relação direta da variável estudada com a idade de ensaio e, conseqüentemente,

com a resistência mecânica, embora representando um acréscimo de pequena magnitude.

A redução do volume de pasta determina o aumento do módulo de deformação, ou seja, o traço mais rico em pasta (50,2%) possui módulo inferior ao traço mais pobre (22,3%) para a mesma resistência, mesmo que o valor da resistência do traço mais fraco seja ligeiramente inferior aos demais. A hipótese que pode ser formulada, nessas condições, é a de ser possível obter um módulo de deformação mais elevada em concretos de resistências inferiores àqueles que possuírem mais elevado volume de pasta. Assim sendo, apresenta-se forte questionamento à relação única estabelecida por diferentes modelos matemáticos que relacionam a resistência à compressão e módulo de deformação.

A Figura 73 apresenta a relação do volume de pasta e de agregados sobre o módulo de deformação nas diferentes idades.

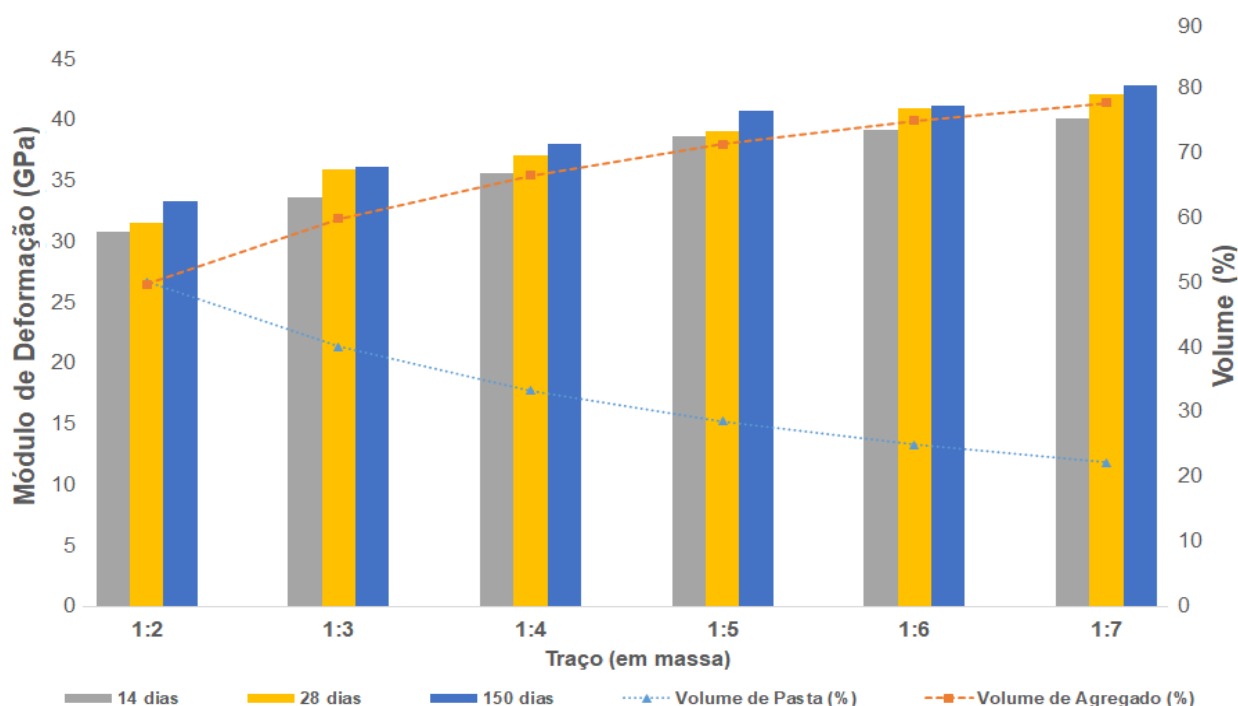


Figura 73 - Volume de Pasta: influência do volume de pasta e de agregado sobre o módulo de deformação, nas diferentes idades

Os resultados apresentados na Figura 73 indicam que a redução do volume de pasta promove o crescimento do valor do módulo de deformação. A redução do volume de pasta de 50,2% para 22,3%, havida nos traços 1:2 e 1:7, ocasiona

elevação no valor do módulo de deformação em 30,5% para a idade de 14 dias; 33,5% aos 28 dias e aos 150 dias de 28,8%.

Assim, conforme é reduzido o volume de pasta, o consumo de cimento Portland também é alterado, ou seja, fixando a resistência à compressão (a/c) o consumo de cimento reduz à medida que o teor de agregado cresce na mistura. A Figura 74 apresenta a relação do consumo de cimento Portland e o módulo de deformação dos concretos produzidos.

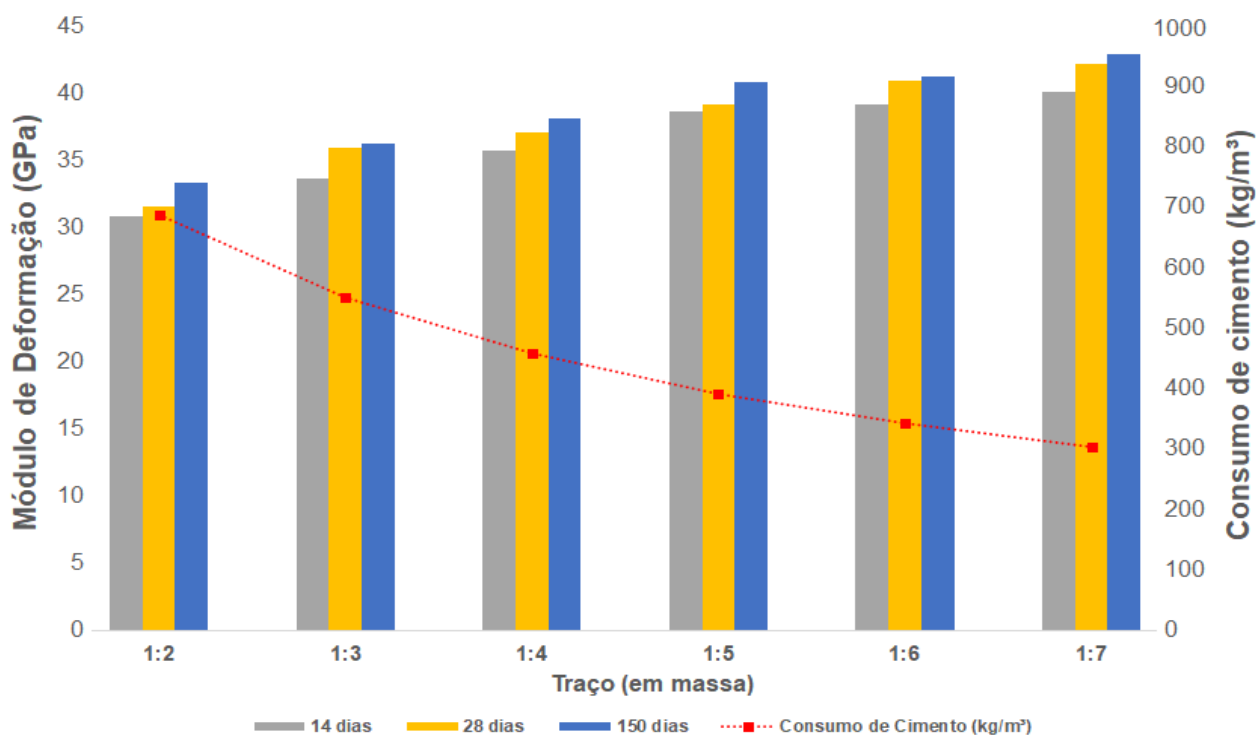


Figura 74 - Volume de Pasta: influência do consumo de cimento Portland no módulo de deformação

Os resultados apresentados demonstram que o aumento no consumo de cimento Portland, para a mesma resistência à compressão, não conduz à elevação do valor de módulo.

5.1.1 Análise de Variância

Para avaliar a influência do volume de pasta e da idade de ensaio, e a interação dessas variáveis com o módulo de deformação, procedeu-se a análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise, considerando o nível de confiança de 95%, estão apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 – Volume de Pasta: resultados da ANOVA

| Fator | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor “p” | Significância |
|---------------------------|--------|-----|--------|---------|-----------------|---------------|
| “Volume de Pasta” | 607,56 | 5 | 121,51 | 45,3 | 0,000000 | S |
| “Idade” | 53,01 | 2 | 26,50 | 9,90 | 0,000375 | S |
| “Volume de Pasta x Idade” | 5,25 | 10 | 0,53 | 0,20 | 0,995360 | NS |
| Erro | 96,37 | 36 | 2,68 | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor “p” – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

A análise de variância indica não haver diferenças significativas no valor do módulo pela interação entre o volume de pasta e idade de ensaio.

O volume de pasta e a idade de ensaio, por sua vez, exercem influência significativa sobre o resultado do módulo de deformação.

Dessa forma, foi realizado o agrupamento de médias para cada faixa de volume de pasta e para as idades, afim de constatar, por meio do teste de Duncan, quais os resultados que podem ser considerados de mesma ordem de grandeza.

A Tabela 47 apresenta os resultados do agrupamento de média para o volume de pasta.

Tabela 47 – Volume de Pasta: agrupamento de médias pelo teste de Duncan

| “Volume de Pasta” | Grupo | E _{cs} médio (GPa) | Grupos Homogêneos | | | | | |
|-------------------|-------|-----------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 50,2% | 1 | 31,9 | -- | 0,000212 | 0,000063 | 0,000053 | 0,000031 | 0,000026 |
| 40,1% | 2 | 35,3 | 0,000212 | -- | 0,035209 | 0,000066 | 0,000053 | 0,000031 |
| 33,4% | 3 | 37,0 | 0,000063 | 0,035209 | -- | 0,002068 | 0,000141 | 0,000053 |
| 28,6% | 4 | 39,6 | 0,000053 | 0,000066 | 0,002068 | -- | 0,234226 | 0,009648 |
| 25,0% | 5 | 40,5 | 0,000031 | 0,000053 | 0,000141 | 0,234226 | -- | 0,109362 |
| 22,3% | 6 | 41,8 | 0,000026 | 0,000031 | 0,000053 | 0,009648 | 0,109362 | -- |

Os resultados obtidos indicam que não há diferença estatística nos valores de módulo de deformação para os volumes de pasta de 28,6% e 25%; e entre 25% e 22,3%, sendo que nos demais casos os resultados de módulo são considerados diferentes.

Assim é possível inferir que o aumento do consumo teórico de cimento Portland não tem relação com o módulo de deformação, ou seja, a elevação do consumo não produz aumento significativo no módulo, ao contrário, reduz o módulo, uma vez que o volume de pasta cresce e a resistência à compressão permanece igual.

Com base no indicativo de haver diferença estatística sobre o módulo de deformação, considerando a idade de ensaio, a Tabela 48 apresenta os resultados obtidos para o agrupamento de médias.

Tabela 48 – Volume de Pasta: agrupamento de médias pelo teste de Duncan para a idade

| "Idade" (dias) | Grupo | E _{cs} médio (GPa) | Grupos Homogêneos | | |
|-------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 1 | 36,4 | -- | 0,012042 | 0,000180 |
| 28 | 2 | 37,8 | 0,012042 | -- | 0,084894 |
| 150 | 3 | 38,8 | 0,000180 | 0,084894 | -- |

É possível verificar que há diferença estatística entre os valores de módulo obtidos aos 14 dias de idade em comparação com aqueles verificados nas idades de 28 e 150 dias. Entretanto, esse comportamento não se verifica entre as idades de 28 e 150 dias.

É possível afirmar que os valores de módulo de deformação obtidos aos 28 dias podem ser considerados estáveis, não sofrendo elevação significativa com o aumento da idade de ensaio, quando a variável isolada é o volume de pasta.

5.1.2 Equação de Regressão

A relação estabelecida entre o volume de pasta e o módulo de deformação do concreto, representada na forma de regressão, é apresentada na Figura 75.

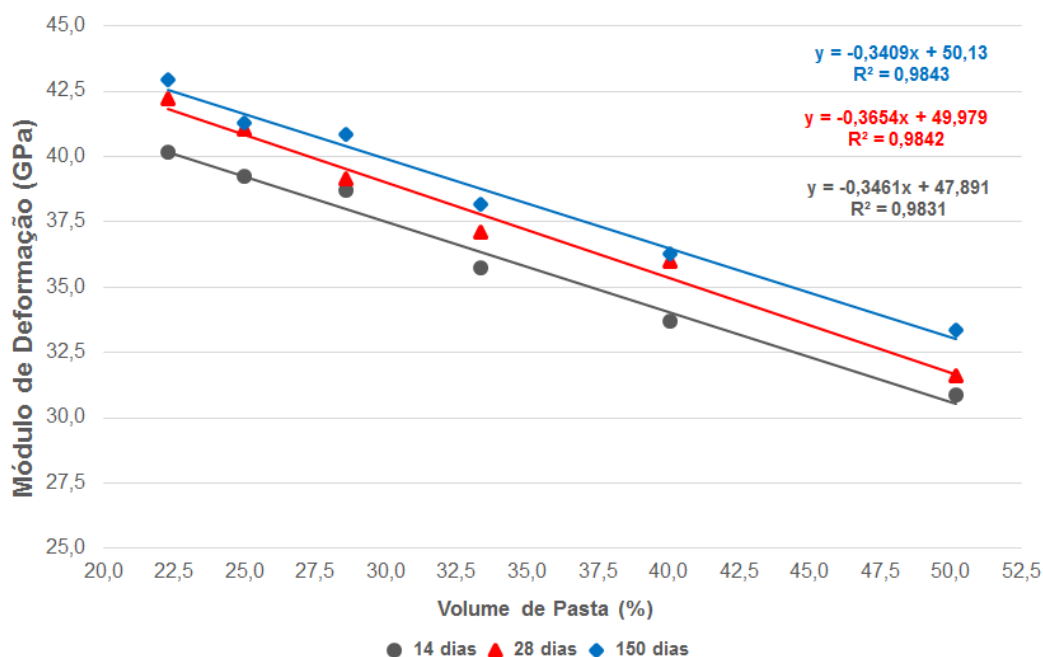


Figura 75 - Volume de Pasta: regressão para o módulo de deformação

É possível, através da Figura 75, verificar que a relação existente entre o volume de pasta e módulo de deformação é linear, considerando a mesma resistência à compressão. Ainda, é verificada a forte correlação do módulo de deformação com o volume de pasta para resistências à compressão de mesma ordem de

grandeza, conforme depreendido da análise do coeficiente de determinação, que experimenta leve elevação para idades maiores.

Para efeito de comparação estão apresentados na Tabela 49 os resultados obtidos pela equação de regressão (28 dias) e os estimados pelo modelo teórico da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 49 – Volume de Pasta: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e à pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Traço (em massa) | Volume de pasta (%) | Resistência à compressão (MPa) | | Módulo de Deformação (GPa) | | |
|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| | | Média (f_{cm}) | Característica (f_{ck}) | Experimental | Regressão (28 dias) | NBR 6118 (2014) |
| 1:2 | 50,2 | 56,3 | 49,7 | 31,6 | 31,6 | 43,8 |
| 1:3 | 40,1 | 58,0 | 51,4 | 36,0 | 35,3 | 44,7 |
| 1:4 | 33,4 | 55,3 | 48,7 | 37,1 | 37,8 | 43,2 |
| 1:5 | 28,6 | 56,7 | 50,1 | 39,1 | 39,5 | 44,0 |
| 1:6 | 25,0 | 58,8 | 52,2 | 41,0 | 40,8 | 45,2 |
| 1:7 | 22,3 | 52,8 | 46,2 | 42,2 | 41,8 | 41,8 |

Os resultados apresentados na Tabela 49 referente à idade de 28 dias mostram que os valores experimentais e os obtidos por meio da equação de regressão (28 dias) são próximos, fato justificado pelo elevado coeficiente de determinação. Entretanto, ao serem comparados os valores obtidos por meio da equação de regressão com o modelo matemático proposto para a NBR 6118 (ABNT, 2014) é constatada grande disparidade. A Figura 76 ilustra o comportamento obtido entre os valores calculados por meio da equação de regressão proposta e pelo modelo matemático da NBR 6118 (ABNT, 2014).

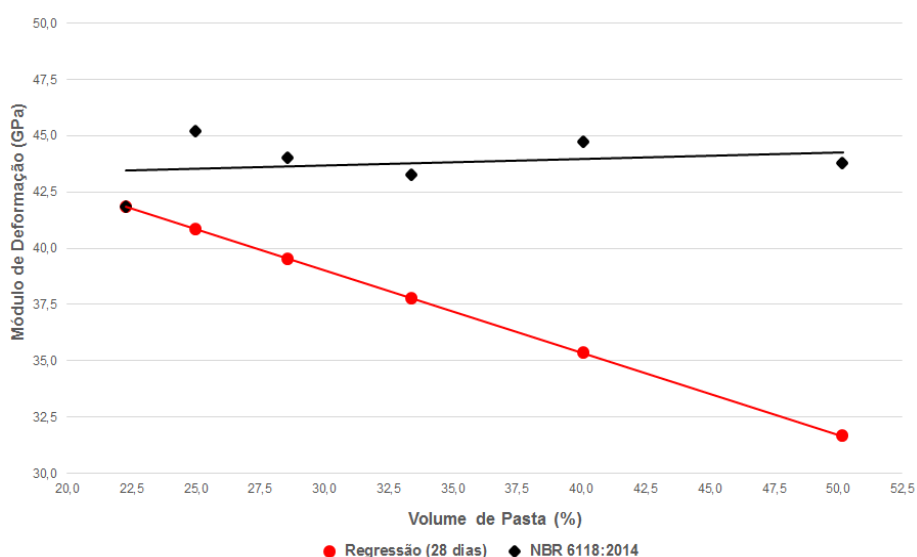


Figura 76 - Volume de Pasta: regressão *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

Nota-se que, com a redução do volume de pasta, os valores possuem maior aproximação, sendo que o menor volume de pasta (22,3%) tem valor coincidente entre o modelo proposto e o teórico apresentado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), refletindo assim em um menor erro de estimativa.

O erro máximo relativo encontrado dentre os valores determinados pela equação de regressão e a proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) é de 38,6%. Os erros calculados para cada traço aos 28 dias estão apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Volume de pasta: erro relativo na determinação do módulo de deformação por meio da equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Traço | Módulo de Deformação (GPa) | | | | | |
|---------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | 1:2 | 1:3 | 1:4 | 1:5 | 1:6 | 1:7 |
| Regressão | 31,6 | 35,3 | 37,8 | 39,5 | 40,8 | 41,8 |
| NBR 6118:2014 | 43,8 | 44,7 | 43,2 | 44,0 | 45,2 | 41,8 |
| Erro (%) | 38,6 | 26,6 | 14,3 | 11,4 | 10,8 | 0 |

Dessa forma, é possível afirmar que o volume de pasta, que não é considerado na equação proposta na metodologia da NBR 6118 (ABNT, 2014).

As maiores diferenças podem ser observadas quando a mistura possui maior volume de pasta ou, no presente caso, maior consumo de cimento, já que é mantida a relação água/cimento.

Assim, o aumento no volume da fase pasta, mais deformável, contribui significativamente para a determinação do valor do módulo de deformação do concreto.

5.1.3 Comparação com Outros Modelos Propostos

A comparação com outros modelos propostos na literatura levou em consideração a utilização dos mesmos materiais, principalmente o agregado graúdo, bem como para a mesma faixa de resistência. Para efeito de comparação foi utilizada a equação de regressão calculada para a idade de 28 dias.

A descrição das equações proposta pelos autores aqui apresentados já foram mencionadas no item 3.3. Os resultados obtidos estão explorados na Tabela 51.

Tabela 51 – Volume de Pasta: comparação entre valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos propostos na bibliografia

| Parâmetro | Traço (em massa) | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | 1:2 | 1:3 | 1:4 | 1:5 | 1:6 | 1:7 |
| Volume de pasta (%) | 50,2 | 40,1 | 33,4 | 28,6 | 25,0 | 22,3 |
| f_{cm} (MPa) | 56,3 | 58,0 | 55,3 | 56,7 | 58,8 | 52,8 |
| f_{ck} (MPa) | 49,7 | 51,4 | 48,7 | 50,1 | 52,2 | 46,2 |
| E_{cs} (GPa) Regressão 28 dias | 31,6 | 35,3 | 37,8 | 39,5 | 40,8 | 41,8 |
| Modelo | Módulo de Deformação (GPa) | | | | | |
| Dal Molin e Monteiro (1996) | 32,1 | 32,5 | 31,9 | 32,2 | 32,6 | 31,4 |
| Barbosa (2009) | 47,4 | 48,1 | 47,0 | 47,6 | 48,5 | 45,9 |
| Kummer (2016) | 35,3 | 35,6 | 35,1 | 35,3 | 35,7 | 34,7 |

Os resultados demonstram que o modelo proposto por Barbosa (2009) conduz a valores superestimados para o módulo de deformação, comparando-os ao proposto para a equação de regressão do volume de pasta. Já as equações apresentadas por Dal Molin e Monteiro (1996) e Kummer (2016) obtêm valores abaixo do estimado pela equação de regressão para o volume de pasta, exceto para o 50,2% de pasta pela equação proposta por Kummer (2016). A Figura 77 apresenta o comportamento obtido pelas equações, frente ao volume de pasta.

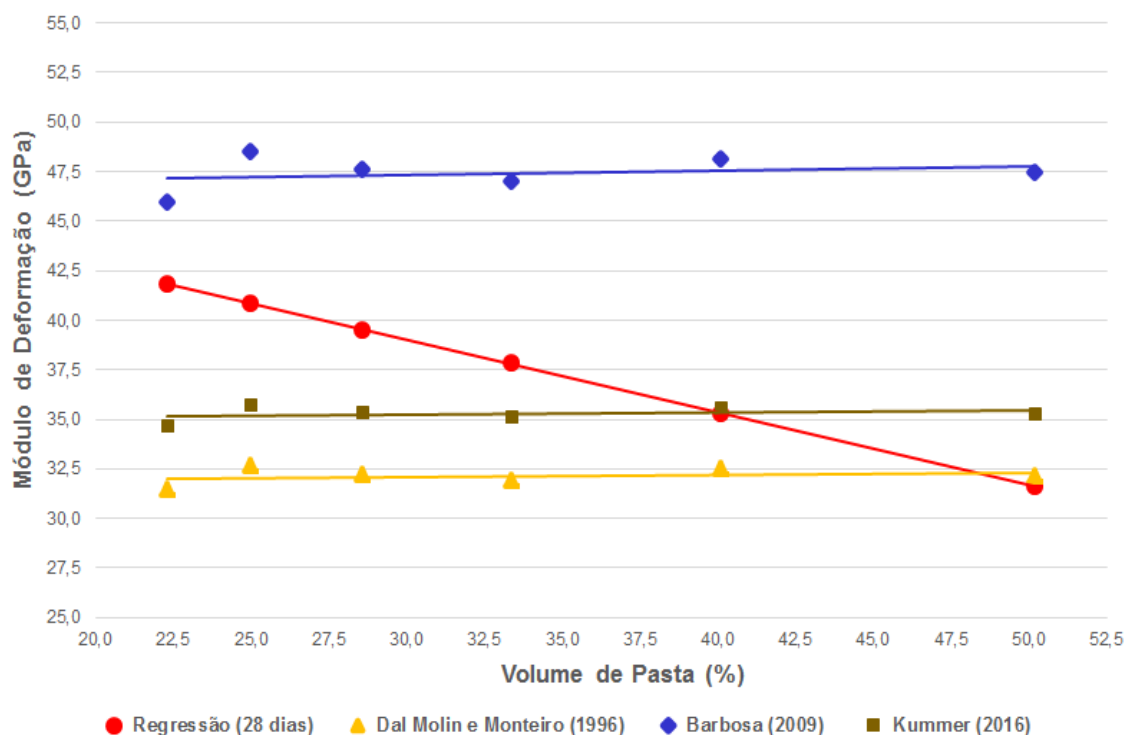


Figura 77 - Volume de Pasta: regressão *versus* modelos propostos na bibliografia

Isto demonstra que as equações propostas pelos autores não levam em consideração o volume de pasta, tendo como principal parâmetro de entrada a resistência característica à compressão (DAL MOLIN e MONTEIRO, 1996; KUMMER, 2016) ou a resistência à compressão média (BARBOSA, 2009). Em paralelo, é possível afirmar que o modelo proposto por Dal Molin e Monteiro (1996) é o mais conservador, pois conduz a obtenção de valores para o módulo de deformação inferiores aos demais.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados referentes à resistência à compressão e módulo de deformação para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias, juntamente com os índices determinados, estão apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 – Resistência à Compressão: resultados obtidos

| Traço (em massa) | | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | |
|--|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Teor de Cinza Volante (%) | | 0 | | | 20 | | | 40 | | | 60 | | | |
| Relação a/c | | 0,409 | | | 0,511 | | | 0,682 | | | 1,02 | | | |
| Consumo de cimento (kg/m ³) | | 551 | 393 | 305 | 440 | 314 | 244 | 331 | 236 | 183 | 221 | 157 | 122 | |
| Volume de pasta (%) | | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 | |
| Volume de agregado (%) | | 59,9 | 71,4 | 77,7 | 59,9 | 71,4 | 77,7 | 59,9 | 71,4 | 77,7 | 59,9 | 71,4 | 77,7 | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | | 135 | 190 | 75 | 145 | 200 | 75 | 195 | 210 | 75 | 210 | 230 | 75 | |
| Resistência à compressão (MPa) | 14 dias | 50,5 | 49,4 | 47,3 | 41,1 | 34,8 | 32,0 | 30,4 | 29,1 | 28,5 | 21,0 | 19,5 | 17,3 | |
| | 28 dias | 58,0 | 56,7 | 52,8 | 46,7 | 42,1 | 39,4 | 37,1 | 32,5 | 30,5 | 26,8 | 22,6 | 20,5 | |
| | 150 dias | 68,6 | 69,1 | 63,9 | 58,5 | 51,4 | 50,4 | 49,8 | 42,3 | 40,5 | 36,7 | 31,2 | 28,8 | |
| Módulo de deformação (GPa) | 14 dias | E _{cs} , médio | 33,7 | 38,7 | 40,2 | 32,8 | 33,2 | 33,8 | 32,3 | 31,2 | 31,9 | 29,1 | 28,4 | 27,5 |
| | | D.P. (GPa) | 2,66 | 0,61 | 0,68 | 1,04 | 1,05 | 1,18 | 1,15 | 0,31 | 1,97 | 0,56 | 1,05 | 0,40 |
| | | CV (%) | 7,89 | 1,57 | 1,70 | 3,09 | 3,17 | 3,51 | 3,57 | 0,98 | 6,18 | 1,91 | 3,71 | 1,47 |
| | 28 dias | E _{cs} , médio | 36,0 | 39,1 | 42,2 | 34,7 | 36,0 | 38,4 | 33,7 | 34,9 | 35,5 | 30,7 | 31,3 | 32,2 |
| | | D.P. (GPa) | 0,29 | 0,67 | 0,75 | 0,56 | 1,19 | 2,56 | 0,59 | 1,06 | 0,46 | 0,80 | 1,00 | 2,72 |
| | | CV (%) | 0,80 | 1,70 | 1,78 | 1,60 | 3,32 | 6,68 | 1,74 | 3,03 | 1,29 | 2,62 | 3,19 | 8,45 |
| | 150 dias | E _{cs} , médio | 36,2 | 40,8 | 42,9 | 35,7 | 37,5 | 39,0 | 34,6 | 35,5 | 37,4 | 31,5 | 32,2 | 33,9 |
| | | D.P. (GPa) | 0,93 | 1,07 | 2,43 | 0,46 | 1,05 | 1,06 | 1,82 | 1,25 | 1,32 | 0,64 | 1,42 | 2,04 |
| | | CV (%) | 2,56 | 2,62 | 5,67 | 1,28 | 2,80 | 2,72 | 5,26 | 3,53 | 3,54 | 2,04 | 4,42 | 6,02 |
| Taxa de Crescimento do E _{cs} (%) | 14 – 28 dias | 6,82 | 1,03 | 4,98 | 2,66 | 8,43 | 13,6 | 4,33 | 11,9 | 11,3 | 5,50 | 10,2 | 17,1 | |
| | Média | 4,28 | | | 8,24 | | | 9,16 | | | 10,9 | | | |
| | 14 – 150 dias | 7,42 | 5,43 | 6,72 | 5,62 | 13,0 | 15,4 | 7,12 | 13,8 | 17,2 | 8,25 | 13,4 | 23,3 | |
| | Média | 6,52 | | | 11,3 | | | 12,7 | | | 15,0 | | | |
| | 28 – 150 dias | 0,56 | 4,35 | 1,66 | 2,88 | 4,17 | 1,56 | 2,67 | 1,72 | 5,35 | 2,61 | 2,88 | 5,28 | |
| | Média | 2,19 | | | 2,87 | | | 3,25 | | | 3,59 | | | |

É possível verificar nos dados da Tabela 52 que ocorre a elevação da relação água/cimento à medida em que o teor de substituição de cimento Portland por

cinza volante aumenta. Por essa razão, há variação no consumo de cimento Portland, embora o volume de pasta seja o mesmo. Com isso, a resistência à compressão é afetada diretamente, obtendo valores decrescentes à medida em que o teor de cinza é elevado. Esse efeito é visualizado em todos os traços e idades de ensaio.

Para o mesmo volume de pasta, o efeito da resistência à compressão sobre o módulo de deformação do concreto tem relação direta, ou seja, a redução da resistência à compressão ocasiona o decréscimo no valor do módulo. A Figura 78 apresenta a influência do teor de cinza volante sobre o módulo de deformação.

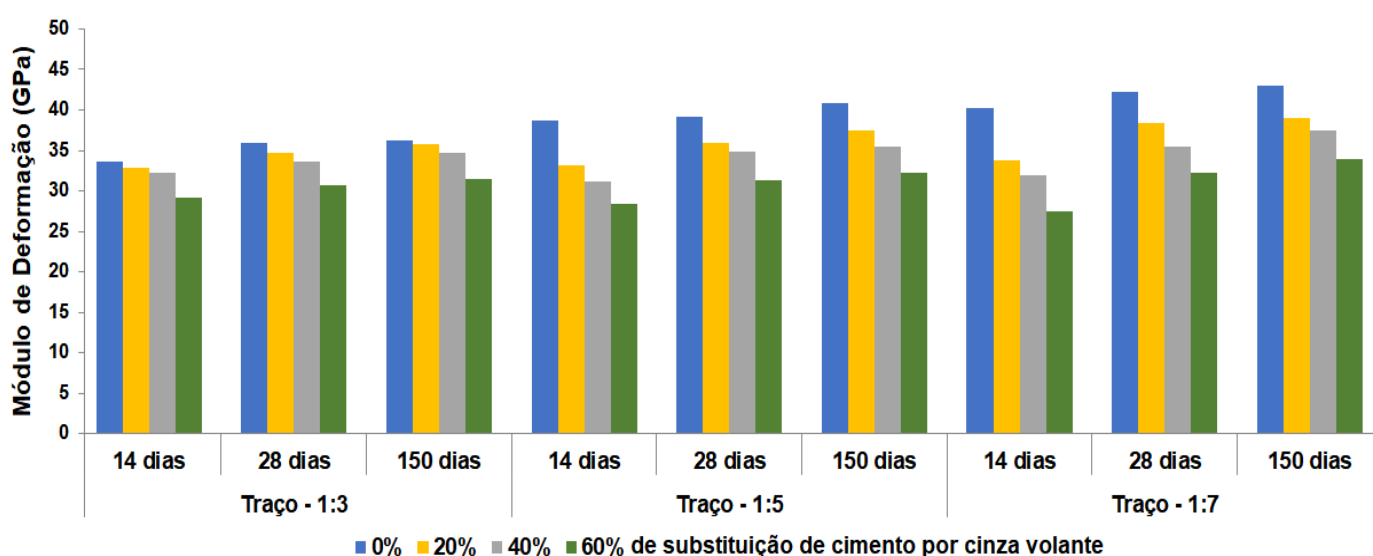


Figura 78 - Resistência à Compressão: influência do teor de cinza no módulo de deformação. Os maiores valores de módulo são observados nos traços onde não há incorporação de cinza volante na mistura, sendo observada a elevação do módulo em todos os traços nas diferentes idades à medida em que aumenta a resistência à compressão.

É necessário destacar que a resistência à compressão está relacionada com o teor de cinza utilizado na mistura, portanto, quanto maior o teor de substituição, menor a resistência à compressão, refletindo assim na redução do módulo de deformação do concreto. Esta observação reforça a relação existente entre resistência à compressão e módulo. Assim, em concretos de mesma resistência o volume de pasta é fundamental na definição do módulo de deformação.

Os dados apresentados na Tabela 52 mostram que os concretos preparados sem cinza volante têm taxa de crescimento inferior, em relação aos que utilizam. É necessário destacar, que o aumento da porcentagem de substituição eleva a taxa de crescimento do módulo, independentemente da idade.

Os concretos de referência (0% de substituição) tiveram entre 14 dias e 28 dias crescimento médio de 4,28%, enquanto que o teor de 60% de cinza apresenta uma elevação de 10,9% no valor do módulo. Essa, diferença é ainda maior entre as 14 dias e 150 dias, onde o crescimento foi de 15% para os concretos com 60% de cinza e de 6,52% para os concretos preparados somente com cimento Portland.

Já entre os 28 dias e 150 dias, o comportamento se repete. O fato reforça a dependência do módulo com a resistência, esta elevada em função da reação pozolânica com o avanço da hidratação.

A Figura 79 apresenta a influência da idade sobre o módulo de deformação para os diferentes teores de cinza volante.

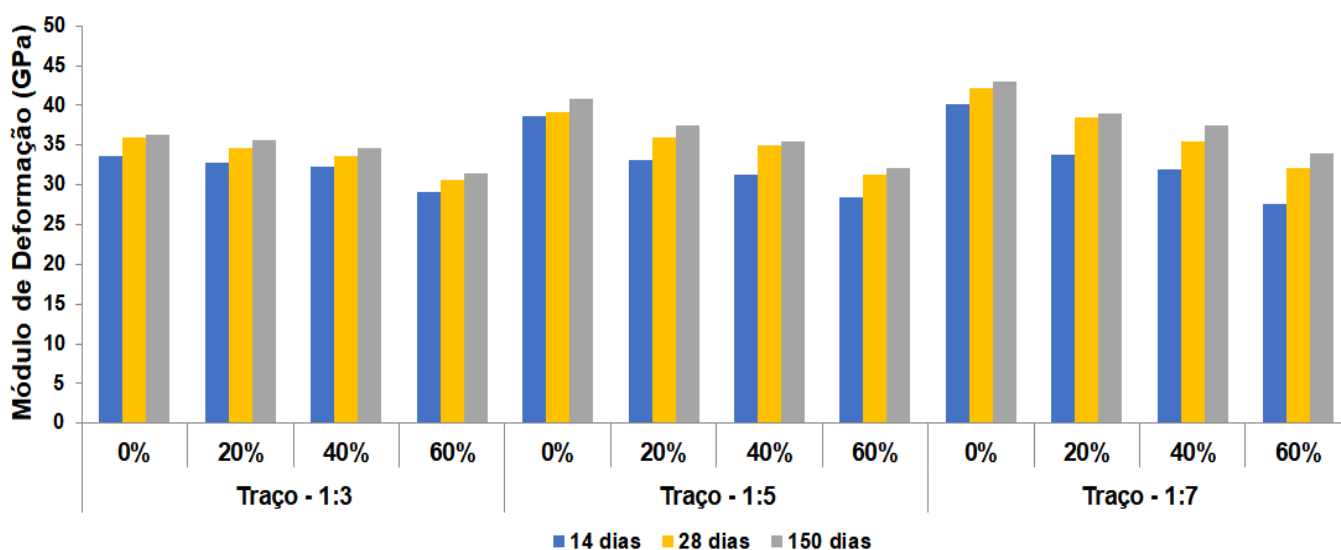


Figura 79 - Resistência à Compressão: influência da idade e do teor de cinza no módulo de deformação

Também, é necessário destacar que o aumento do teor de agregados (miúdo e graúdo) conduz aos maiores valores de módulo de deformação, ou seja, a redução no volume de pasta também interfere no valor do módulo com já afirmado no item 5.1. Entretanto esse comportamento não é visualizado para os teores de 40% e 60% de cinza volante, em especial, aos 14 dias. A Figura 80

apresenta a influência da proporção do traço e teor de cinza sobre o módulo de deformação nas diferentes idades.

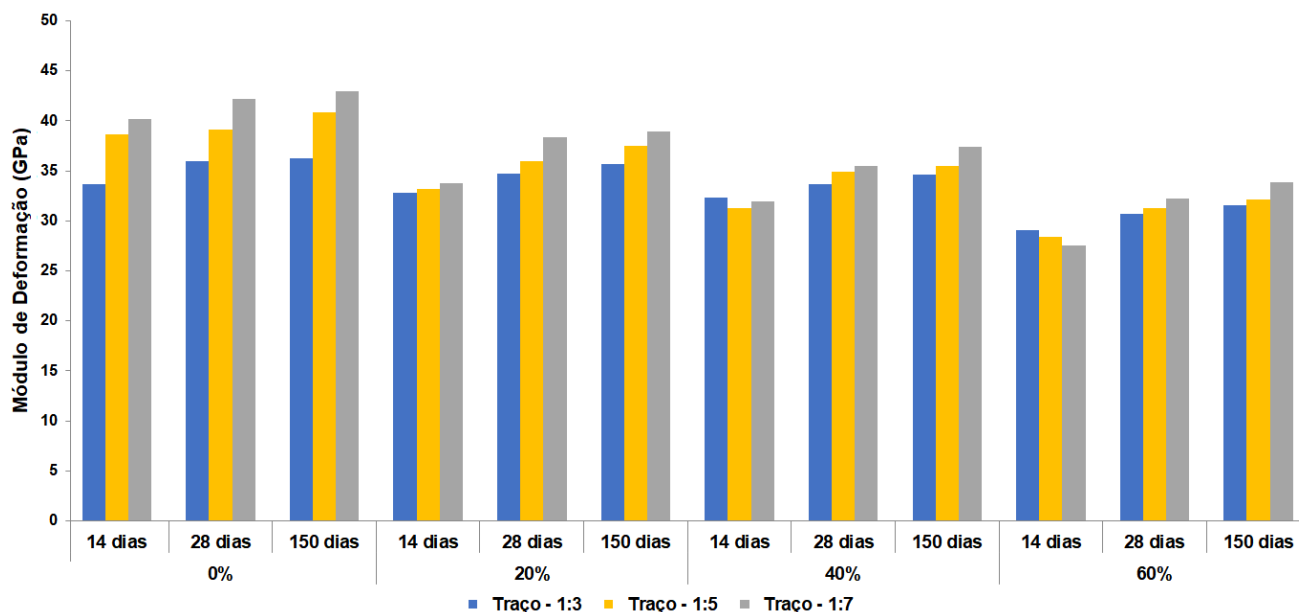


Figura 80 - Resistência à Compressão: influência do teor de agregado no módulo de deformação, nas diferentes idades

Com base na Figura 80 não pode ser descartada a possibilidade de que a pasta de cimento com altos teores de cinza volante, em idades iniciais, não disponha de resistência e rigidez necessária para transferir aos agregados os esforços. Assim, com a evolução da hidratação esse comportamento é otimizado e a partir dos 28 dias, o módulo tem valor aumentado com o aumento do teor de agregado graúdo.

Caso a hipótese descrita acima seja verificada, cimentos Portland que apresentem maior rendimento quanto à resistência à compressão conduzem a elevação no valor do módulo de deformação.

5.2.1 Análise de Variância

Para avaliar a influência da resistência à compressão e da idade de ensaio, assim como a interação dessas variáveis sobre o módulo de deformação, procedeu-se a análise de variância (ANOVA). O fator utilizado para associar a resistência foi o teor de cinza volante empregado nas misturas. Os resultados da análise, considerando o nível de confiança de 95%, estão apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 – Resistência à Compressão: resultados da ANOVA

| Fator | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor “p” | Significância |
|---------------------------------|-------|-----|-------|---------|-----------------|---------------|
| “Teor de Cinza Volante” | 921,3 | 3 | 307,1 | 74,72 | 0,000000 | S |
| “Idade” | 262,6 | 2 | 131,3 | 31,95 | 0,000000 | S |
| “Teor de Cinza Volante x Idade” | 10,8 | 6 | 1,8 | 0,44 | 0,853204 | NS |
| Erro | 394,6 | 96 | 4,1 | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor “p” – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Com base nos resultados da Tabela 53 é possível afirmar que a resistência à compressão e a idade de ensaio exercem influência significativa sobre o valor do módulo de deformação do concreto. Entretanto, a interação entre esses fatores não causa efeito significativo.

Com base nos comportamentos acusados pela análise de variância, foi realizado o Teste de Duncan, a fim de constatar as semelhanças entre os valores de módulo de deformação, conduzidos pelos diferentes teores de cinza volante (resistência à compressão). Na Tabela 54 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 54 – Resistência à Compressão: agrupamento de médias para o teor de cinza volante

| “Teor de Cinza Volante” | Grupo | E _{cs médio} (GPa) | Grupos Homogêneos | | | |
|-------------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0% | 1 | 38,867 | -- | 0,000110 | 0,000053 | 0,000047 |
| 20% | 2 | 35,674 | 0,000110 | -- | 0,005749 | 0,000053 |
| 40% | 3 | 34,111 | 0,000053 | 0,005749 | -- | 0,000110 |
| 60% | 4 | 30,756 | 0,000047 | 0,000053 | 0,000110 | -- |

Os resultados indicam que os diferentes teores de substituição, ou seja, resistência à compressão, conduzem a valores distintos de módulo de deformação. Na Tabela 55 estão apresentados os resultados obtidos do agrupamento de médias para a idade de ensaio.

Tabela 55 – Resistência à Compressão: agrupamento de médias para a idade

| “Idade” (dias) | Grupo | E _{cs médio} (GPa) | Grupos Homogêneos | | |
|-------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 1 | 32,733 | -- | 0,000110 | 0,000053 |
| 28 | 2 | 35,381 | 0,000110 | -- | 0,028825 |
| 150 | 3 | 36,442 | 0,000053 | 0,028825 | -- |

É verificado que, para todas as idades, o módulo de deformação do concreto é considerado significativamente diferente, não havendo semelhança entre os resultados. Dessa forma é possível afirmar que os crescimentos calculados na Tabela 53 são significativos sobre o valor do módulo de deformação do concreto.

5.2.2 Equação de regressão

Com base na resistência à compressão e os valores do módulo de deformação para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias foram determinadas as equações de regressão. Para a definição do comportamento foi adotado o respectivo traço em massa e a suas substituições por cinza volante. As Figuras 81, 82 e 83 apresentam o comportamento da resistência à compressão dos traços reproduzidos.

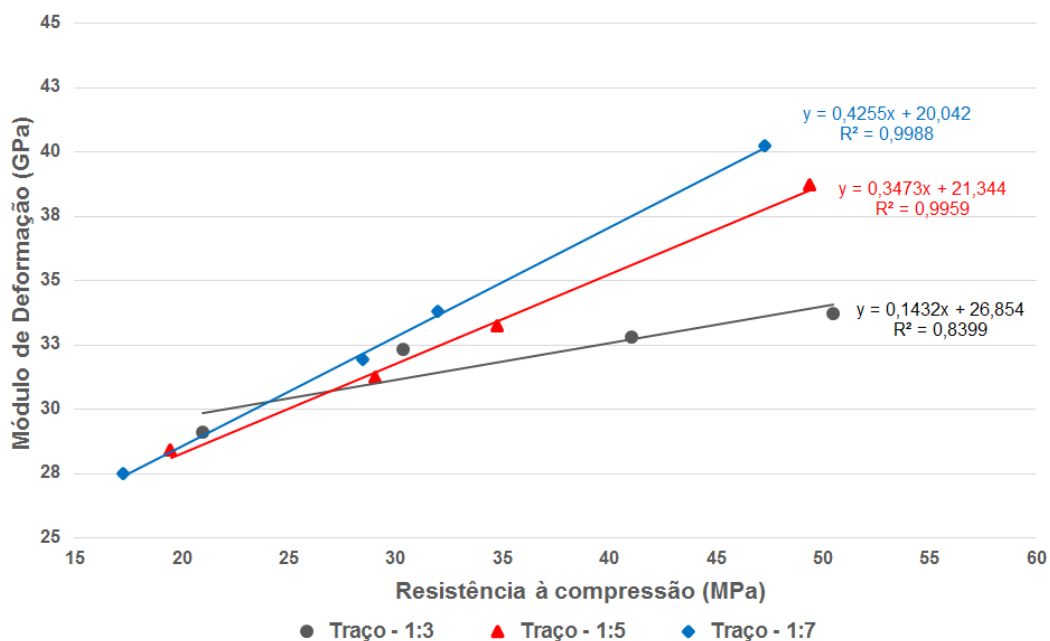


Figura 81 - Resistência à Compressão: regressão para o módulo de deformação aos 14 dias

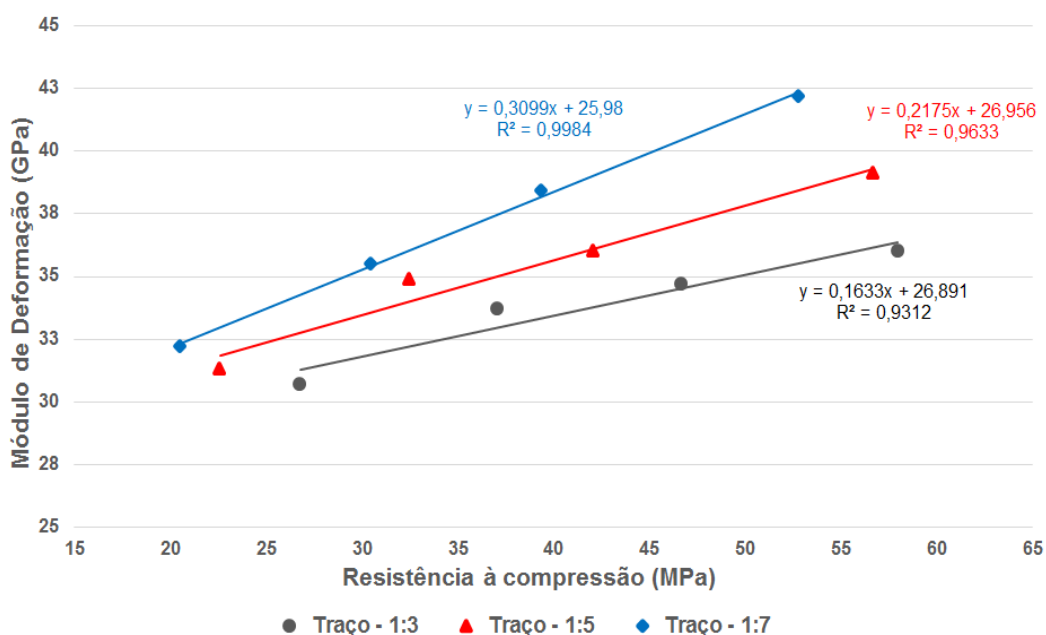


Figura 82 - Resistência à Compressão: regressão para o módulo de deformação aos 28 dias

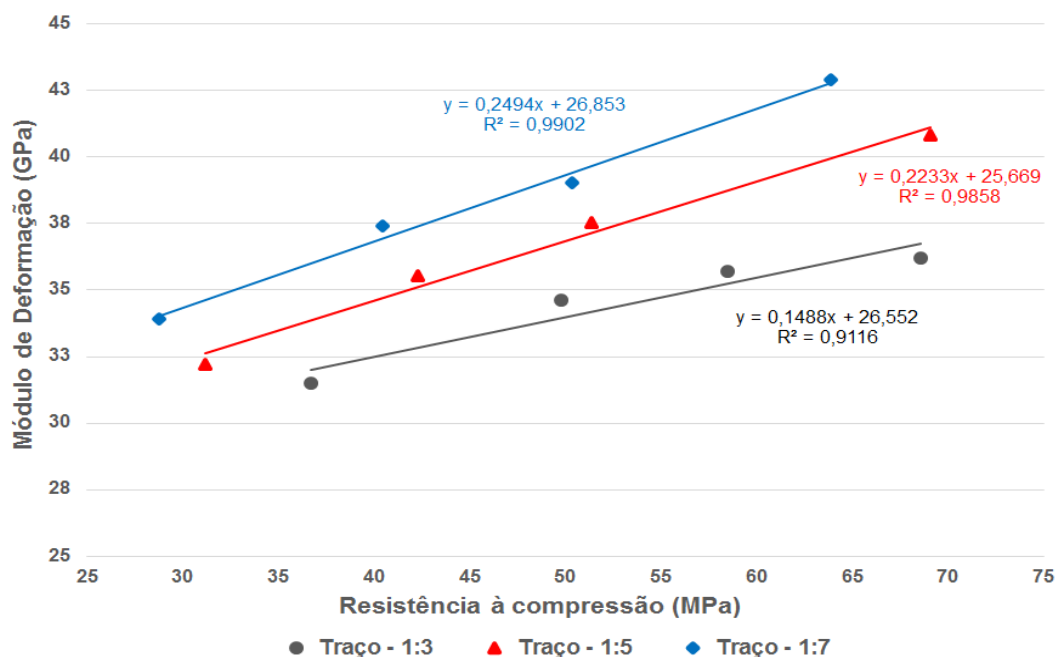


Figura 83 - Resistência à Compressão: regressão para o módulo de deformação aos 150 dias. As Figuras 81, 82 e 83 indicam que à medida em que aumenta a resistência à compressão - reduzido o teor de cinza volante na mistura, cresce o módulo de deformação do concreto. Também, é constatado que o aumento na proporção de agregado condiciona a elevação da rigidez da mistura em todas as idades.

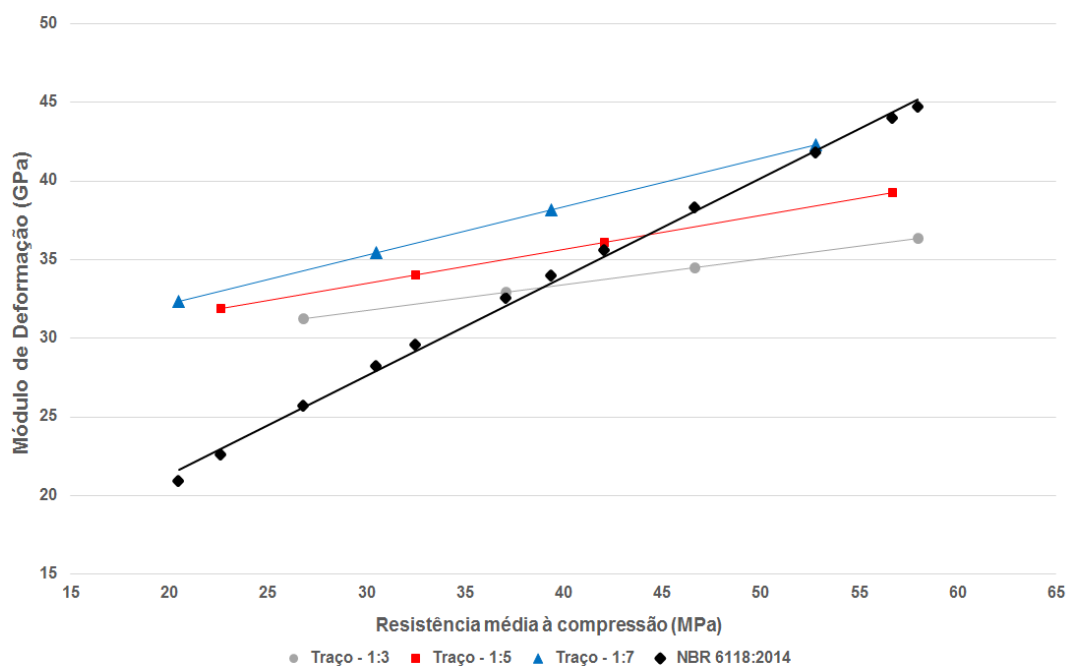
Ainda, a relação entre a resistência à compressão e o módulo de deformação do concreto obedece ao modelo linear. Os coeficientes de determinação revelam a forte correlação do módulo de deformação com a resistência à compressão.

Para efeito de comparação estão apresentados na Tabela 56 os resultados obtidos pelas equações de regressão (28 dias) e os estimados pelo modelo teórico da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 56 – Resistência à Compressão: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Traço (em massa) | Cinza Volante (%) | Resistência à compressão (MPa) | | Módulo de Deformação (GPa) | | |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------|----------|
| | | Média (f_{cm}) | Característica (f_{ck}) | Experimental | Regressão | NBR 6118 |
| 1:3 | 0 | 58,0 | 51,4 | 36,0 | 36,4 | 44,7 |
| | 20 | 46,7 | 40,1 | 34,7 | 34,5 | 38,3 |
| | 40 | 37,1 | 30,5 | 33,7 | 32,9 | 32,5 |
| | 60 | 26,8 | 20,2 | 30,7 | 31,3 | 25,7 |
| 1:5 | 0 | 56,7 | 50,1 | 39,1 | 39,3 | 44,0 |
| | 20 | 42,1 | 35,5 | 36,0 | 36,1 | 35,6 |
| | 40 | 32,5 | 25,9 | 34,9 | 34,0 | 29,6 |
| | 60 | 22,6 | 16,0 | 31,3 | 31,9 | 22,6 |
| 1:7 | 0 | 52,8 | 46,2 | 42,2 | 42,3 | 41,8 |
| | 20 | 39,4 | 32,8 | 38,4 | 38,2 | 33,9 |
| | 40 | 30,5 | 23,9 | 35,5 | 35,4 | 28,2 |
| | 60 | 20,5 | 13,9 | 32,2 | 32,3 | 20,9 |

Os valores obtidos para o módulo de deformação via equação de regressão conduzem a pequenos afastamentos, quando comparados aos valores obtidos experimentalmente, justificando assim o alto coeficiente de determinação dos modelos. Já, o módulo de deformação calculado pelo método proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta comportamento variado, pois até a resistência média à compressão de 39 MPa, subestima os resultados e, posteriormente, superestima. A Figura 84 apresenta o comportamento obtido entre as equações de regressão e o modelo proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 84 - Resistência à Compressão: equação de regressão *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

Vale ressaltar que embora o eixo das abcissas apresente a resistência média à compressão (f_{cm}) os resultados para a metodologia da NBR 6118 (ABNT, 2014) foram determinados com base na resistência característica à compressão (f_{ck}). A Figura 84 apresenta o módulo de deformação crescente à medida em que ocorre a elevação da resistência à compressão do concreto para todas as equações.

É preciso destacar que os modelos propostos na Tabela 56 apresentam alguns valores próximos aos estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Nas equações referentes aos maiores volumes de pasta (traços 1:3 e 1:5) é possível verificar que o módulo obtido por esses modelos são superestimados, ao comparar ao proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) até a resistência à compressão média de 38 MPa (traço 1:3) e 44 MPa (traço 1:5). A partir desse limite de resistência a NBR 6118 (ABNT, 2014) obtém valores superiores ao encontrado pelas equações.

Para a faixa de resistência à compressão média estudada (20,5 MPa a 58 MPa) a estimativa do módulo de deformação do concreto pela equação do traço com maior quantidade de agregado (1:7) sempre acusou valores mais elevados, frente a NBR 6118 (ABNT, 2014). Na Figura 84 ocorre a intersecção desse modelo com a equação proposta em norma no ponto de resistência à compressão média de 58 MPa.

Dessa forma, é possível afirmar que o módulo não depende exclusivamente da resistência à compressão.

Diante das informações apresentadas, o módulo de deformação estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) não leva em consideração o volume de pasta e de agregado. É notória a importância dessas variáveis, pois mesmo que a resistência à compressão seja baixa, há elevação no valor do módulo, com o aumento do volume de agregado e redução do volume de pasta.

5.2.3 Comparação com outros modelos propostos

A comparação com outros modelos propostos na literatura levou em consideração a faixa de resistência à compressão e o tipo de agregado utilizado. Para efeito de comparação foram utilizadas as equações de regressão para a resistência à compressão dos traços na idade de 28 dias.

A descrição das equações proposta pelos autores aqui apresentados já foram mencionadas no item 3.3. Os resultados obtidos estão explorados na Tabela 57.

Tabela 57 – Resistência à Compressão: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com equações da bibliografia

| Traço | 1:3 | | | | 1:5 | | | | 1:7 | | | |
|-----------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teor de Cinza | 0% | 20% | 40% | 60% | 0% | 20% | 40% | 60% | 0% | 20% | 40% | 60% |
| f_{cm} (MPa) | 58,0 | 46,7 | 37,1 | 26,8 | 56,7 | 42,1 | 32,5 | 22,6 | 52,8 | 39,4 | 30,5 | 20,5 |
| f_{ck} (MPa) | 51,4 | 40,1 | 30,5 | 20,2 | 50,1 | 35,5 | 25,9 | 16,0 | 46,2 | 32,8 | 23,9 | 13,9 |
| E_{cs} (GPa) - Regressão | 36,4 | 34,5 | 32,9 | 31,3 | 39,3 | 36,1 | 34,0 | 31,9 | 42,3 | 38,2 | 35,4 | 32,3 |
| Modelo | Módulo de Deformação (GPa) | | | | | | | | | | | |
| Dal Molin e Monteiro (1996) | 32,5 | 30,1 | 27,6 | 24,3 | 32,2 | 28,9 | 26,2 | 22,6 | 31,4 | 28,2 | 25,6 | 21,6 |
| Barbosa (2009) | 48,1 | 43,2 | 38,5 | 32,7 | 47,6 | 41,0 | 36,0 | 30,0 | 45,9 | 39,7 | 34,9 | 28,6 |
| Kummer (2016) | 35,6 | 33,6 | 31,5 | 28,6 | 35,3 | 32,6 | 30,3 | 27,1 | 34,7 | 32,0 | 29,8 | 26,2 |

Os resultados obtidos pelas equações de regressão conduzem, em sua maior parte, aos mais elevados valores de módulo de deformação. Entretanto, o modelo proposto por Barbosa (2009) tem comportamento similar a NBR 6118 (ABNT,2014), conforme discutido anteriormente.

Ao analisar os valores de módulo de deformação calculados pelas equações propostas por Dal Molin e Monteiro (1991) e Kummer (2016), os resultados são inferiores ao determinado pelos modelos propostos. A Figura 85 apresenta os resultados calculados para os autores citados, bem como os obtidos pelas equações de regressão.

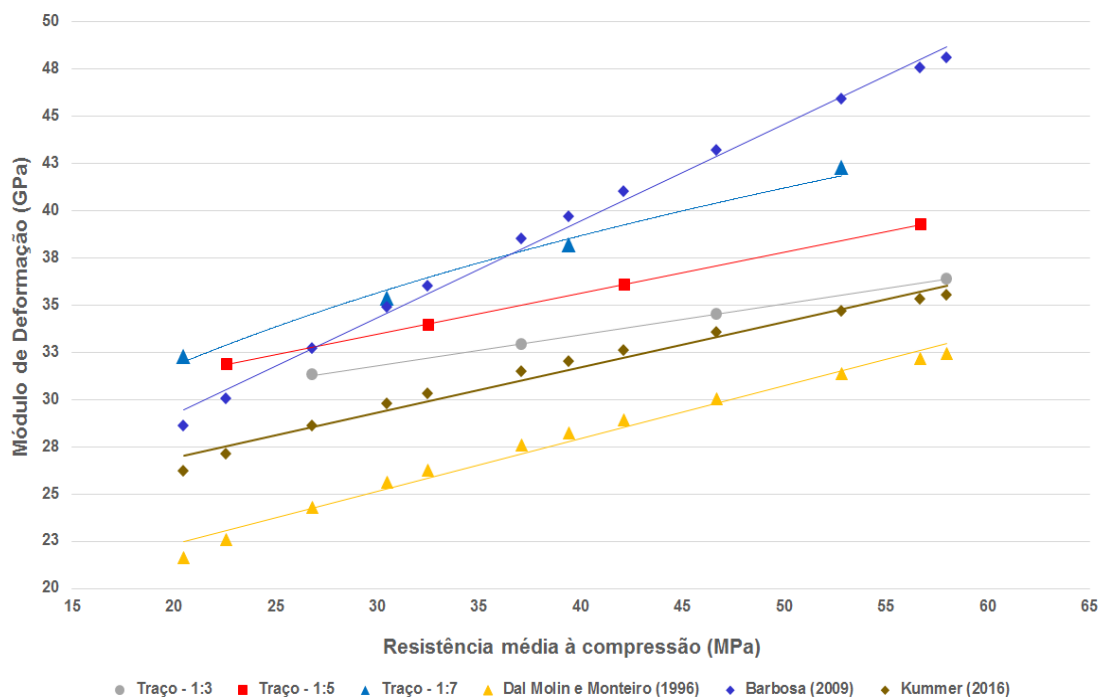


Figura 85 - Resistência à Compressão: regressão *versus* outros modelos propostos

Na Figura 85 é possível verificar que o modelo proposto por Kummer (2016) apresenta valores próximos aos estimados pela equação do traço 1:3 (maior volume de pasta). Já a proposta de Dal Molin e Monteiro (1991) conduzem aos menores valores de módulo de deformação do concreto em qualquer situação.

Ainda, com o crescimento da resistência à compressão os valores de módulo de deformação, obtido pelas equações de Dal Molin e Monteiro (1996) e Kummer (2016), se assemelham dos modelos propostos para o estudo dessa variável.

Por outro lado, os modelos apresentados pelos autores supracitados não levam em sua concepção as proporções dos materiais, ou seja, volume de agregado e de pasta. Com isso, o traço (1:7), com maior volume de agregado, apresenta as maiores diferenças no valor do módulo de deformação do concreto.

5.3 TEOR DE ARGAMASSA

A Tabela 58 apresenta os resultados referentes à resistência à compressão e módulo de deformação para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias, juntamente com os índices determinados.

Tabela 58 – Teor de Argamassa: resultados obtidos

| Parâmetro | | Traço (em massa) | | | | | | | | | | |
|--|--|------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1:3 | | | 1:5 | | | 1:7 | | | | |
| Teor de Argamassa (%) | | 48 | 54 | 60 | 48 | 54 | 60 | 48 | 54 | 60 | | |
| Consumo de cimento (kg/m ³) | | 551 | | | 393 | | | 305 | | | | |
| Volume de pasta (%) | | 40,1 | | | 28,6 | | | 22,3 | | | | |
| Volume de agregado (%) | | 59,9 | | | 71,4 | | | 77,7 | | | | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | | 150 | 135 | 165 | 180 | 190 | 160 | 75 | 75 | 75 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | | 14 dias | | 48,0 | 50,5 | 49,7 | 48,2 | 49,4 | 51,0 | 45,8 | 47,3 | 44,5 |
| | | 28 dias | | 53,9 | 58,0 | 55,7 | 57,4 | 56,7 | 53,4 | 50,2 | 52,8 | 47,9 |
| | | 150 dias | | 66,2 | 68,6 | 67,5 | 67,9 | 69,1 | 68,3 | 60,3 | 63,9 | 57,5 |
| Módulo de deformação (GPa) | | 14 dias | E _{cs} , médio | 35,1 | 33,7 | 33,4 | 39,1 | 38,7 | 38,3 | 38,5 | 40,2 | 36,0 |
| | | | D.P. (GPa) | 0,92 | 2,66 | 1,26 | 0,85 | 0,61 | 2,24 | 1,48 | 0,68 | 0,55 |
| | | | CV (%) | 2,62 | 7,89 | 3,77 | 2,17 | 1,58 | 5,85 | 3,84 | 1,69 | 1,53 |
| | | 28 dias | E _{cs} , médio | 36,1 | 36,0 | 35,1 | 39,1 | 39,1 | 38,7 | 42,0 | 42,2 | 38,3 |
| | | | D.P. (GPa) | 0,91 | 0,29 | 0,23 | 1,60 | 0,67 | 1,32 | 0,45 | 0,75 | 0,70 |
| | | | CV (%) | 2,52 | 0,81 | 0,66 | 4,09 | 1,71 | 3,41 | 1,07 | 1,78 | 1,83 |
| | | 150 dias | E _{cs} , médio | 37,1 | 36,2 | 35,4 | 40,6 | 40,8 | 39,9 | 42,2 | 42,9 | 41,4 |
| | | | D.P. (GPa) | 0,57 | 0,93 | 0,45 | 0,61 | 1,07 | 2,00 | 0,55 | 2,43 | 1,85 |
| | | | CV (%) | 1,54 | 2,57 | 1,27 | 1,50 | 2,62 | 5,01 | 1,30 | 5,66 | 4,47 |
| Taxa de Crescimento do E _{cs} (%) | | 14 – 28 dias | | 2,85 | 6,83 | 5,09 | 0 | 1,03 | 1,04 | 9,09 | 4,98 | 6,39 |
| | | Média | | 4,14 | | | | | | | | |
| | | 14 – 150 dias | | 5,70 | 7,42 | 5,99 | 3,84 | 5,43 | 4,18 | 9,61 | 6,72 | 15,0 |
| | | Média | | 7,10 | | | | | | | | |
| | | 28 – 150 dias | | 2,77 | 0,56 | 0,86 | 3,84 | 4,35 | 3,10 | 0,48 | 1,66 | 8,09 |
| | | Média | | 2,86 | | | | | | | | |

É possível considerar que a resistência à compressão obtida dos diferentes traços como de mesma ordem de grandeza, sendo menor no traço 1:7, independente do teor de argamassa (48%, 54% e 60%). Entretanto, esse comportamento não se reflete sobre o módulo de deformação.

A taxa de crescimento médio obtido entre 14 dias e 28 dias foi de 4,14%. Já, para o período entre 14 dias e 150 dias o crescimento foi de 7,10%, e entre 28 dias e 150 dias o crescimento médio foi de 2,86%, ou seja, há redução da taxa de crescimento com o avanço do grau de hidratação.

Alterações no teor de argamassa modificam o valor do módulo nas diferentes idades, conforme ilustra a Figura 86.

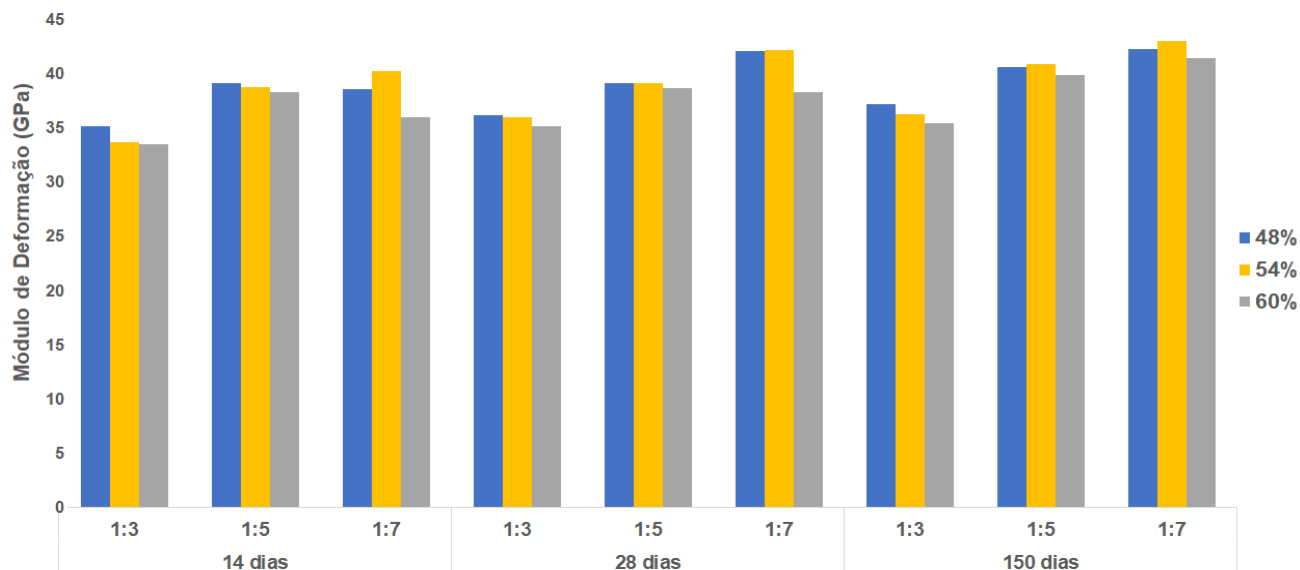


Figura 86 - Teor de Argamassa: influência sobre o módulo de deformação nas diferentes idades
A Figura 86 indica que em alguns casos, o teor de argamassa de 54% conduz a valores superiores de módulo, quando comparado aos demais (48% e 60%).

Novamente é evidenciada a influência direta do aumento do volume de agregado na mistura sobre o módulo de deformação, independentemente da idade de ensaio. Essa constatação apresenta similaridade com o estudo realizado, tendo como variável o volume de pasta. Essa variável de dosagem também gera crescimento do valor do módulo, assim como o decréscimo no volume de pasta e de consumo de cimento Portland. A Figura 87 apresenta o comportamento verificado.

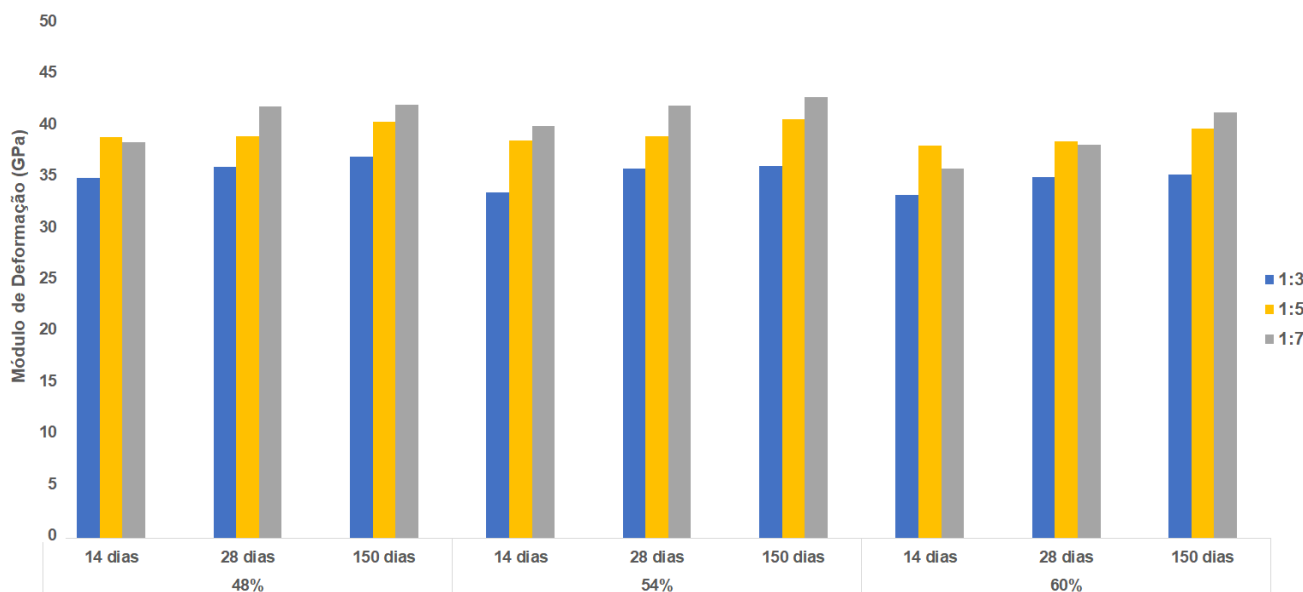


Figura 87 - Teor de Argamassa: influência do teor de agregado sobre o módulo de deformação

Como era de se esperar, o valor do módulo de deformação cresce com a evolução da idade de ensaio, independente do traço utilizado e teor de argamassa definido. A análise do efeito da idade sobre o valor do módulo é apresentado na Figura 88.

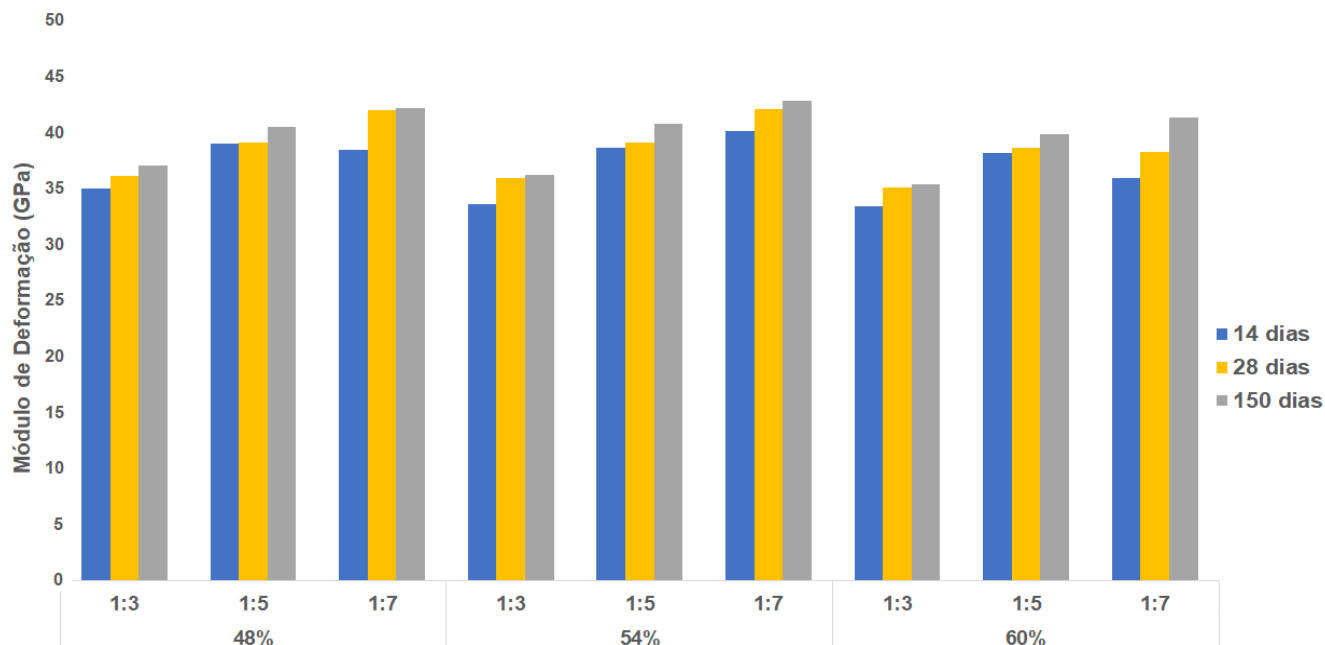


Figura 88 - Teor de Argamassa: influência dos teores sobre o módulo de deformação, nas diferentes idades

É possível verificar que à medida em que cresce a idade, o módulo de deformação do concreto aumenta, independente do traço e teor de argamassa.

5.3.1 Análise de Variância

Para avaliar a influência do teor de argamassa e da idade de ensaio, assim como a interação dessas variáveis sobre o módulo de deformação foi realizada a análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise considerando o nível de confiança de 95% estão apresentados na Tabela 59.

Tabela 59 – Teor de Argamassa: resultados da ANOVA

| Fator | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor "p" | Significância |
|-----------------------------|-------|-----|------|---------|-----------------|---------------|
| "Teor de Argamassa" | 39,8 | 2 | 19,9 | 2,76 | 0,069843 | NS |
| "Idade" | 94,7 | 2 | 47,3 | 6,57 | 0,002398 | S |
| "Teor de Argamassa x Idade" | 1,5 | 4 | 0,4 | 0,05 | 0,994546 | NS |
| Erro | 518,8 | 72 | 7,2 | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor "p" – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Através dos resultados apresentados na Tabela 59 é possível verificar que o teor de argamassa, bem como sua interação com a idade não exerce influência sobre

o módulo de deformação. Entretanto, a análise de variância indicou haver influência da idade de ensaio sobre o módulo de deformação.

Dessa forma foi realizado o agrupamento de médias para cada idade, a fim de constatar por meio do teste de Duncan, quais os resultados que são considerados homogêneos, ou seja, similares. A Tabela 60 apresenta os resultados do agrupamento de média para o teor de argamassa.

Tabela 60 – Teor de Argamassa: agrupamento de médias pelo teste de Duncan para a idade

| "Idade" (dias) | Grupo | E _{cs médio} (GPa) | Grupos Homogêneos | | |
|-------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 1 | 36,993 | -- | 0,040362 | 0,000855 |
| 28 | 2 | 38,519 | 0,040362 | -- | 0,132780 |
| 150 | 3 | 39,630 | 0,000855 | 0,132780 | -- |

Os resultados apresentados na Tabela 60 permitem afirmar que os valores de módulo do concreto aos 14 dias são diferentes dos apresentados aos 28 dias e 150 dias. Entretanto, os resultados obtidos aos 28 dias e 150 dias são considerados iguais. Dessa forma é possível inferir que o crescimento do módulo de deformação não é significativo entre 28 dias e 150 dias.

5.3.2 Equação de regressão

Para a variável em estudo foi estabelecida uma regressão, correlacionando o teor de argamassa e o valor médio do módulo de deformação aos 14 dias, 28 dias e 150 dias. Os modelos propostos consideram fixa a resistência à compressão e os volumes de pasta e agregado, dentro do traço estudado.

A Figura 89 apresenta o comportamento da relação existente entre o teor de argamassa e o módulo de deformação.

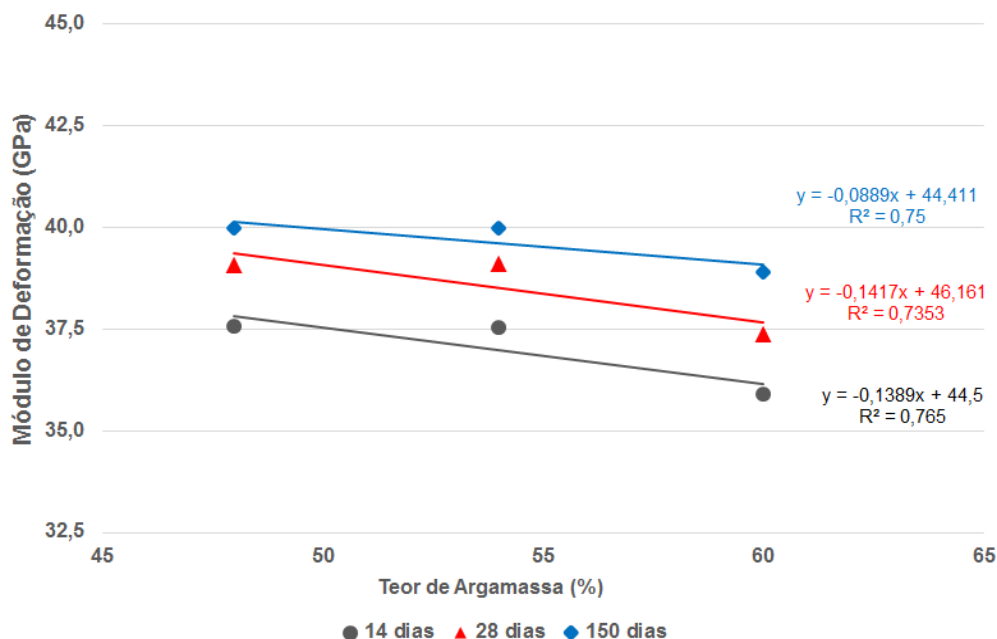


Figura 89 - Teor de Argamassa: regressão para o módulo de deformação

O modelo matemático estabelecido pode ser considerado como de desenvolvimento linear. Nota-se que os valores médios do módulo obtido com os teores de argamassa de 48% e 54% são superiores em comparação com aqueles obtidos com o teor de 60%, porém não há diferença significativa entre eles conforme destacado no item 5.3.1.

Para efeito de comparação estão apresentados na Tabela 61 os resultados obtidos pela equação de regressão (28 dias) e os estimados pelo modelo teórico da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 61 – Teor de Argamassa: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Traço (em massa) | Teor de Argamassa (%) | Resistência à compressão (MPa) | | Módulo de Deformação (GPa) | | | |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------|-------|
| | | Média (f_{cm}) | Característica (f_{ck}) | Experimental | Regressão (28 dias) | NBR 6118:2014 | |
| | | | | | | Individual | Média |
| 1:3 | 48 | 53,9 | 47,3 | 36,1 | 39,4 | 42,4 | 42,4 |
| 1:5 | | 57,4 | 50,8 | 39,1 | | 44,4 | |
| 1:7 | | 50,2 | 43,6 | 42,0 | | 40,3 | |
| 1:3 | 54 | 58,0 | 51,4 | 36,0 | 38,5 | 44,7 | 43,5 |
| 1:5 | | 56,7 | 50,1 | 39,1 | | 44,0 | |
| 1:7 | | 52,8 | 46,2 | 42,2 | | 41,8 | |
| 1:3 | 60 | 55,7 | 49,1 | 35,1 | 37,7 | 43,5 | 41,5 |
| 1:5 | | 53,4 | 46,8 | 38,7 | | 42,2 | |
| 1:7 | | 47,9 | 41,3 | 38,3 | | 39,0 | |

Os resultados apresentados na Tabela 61 mostram que os valores obtidos experimentalmente são inferiores aos estimados pela equação da NBR 6118 (ABNT, 2014), independente do teor de argamassa utilizado. Os valores calculados pela equação de regressão ficam aquém dos obtidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014). A Figura 90 ilustra os valores médios para o módulo de deformação do concreto, obtido pelas metodologias descritas acima.

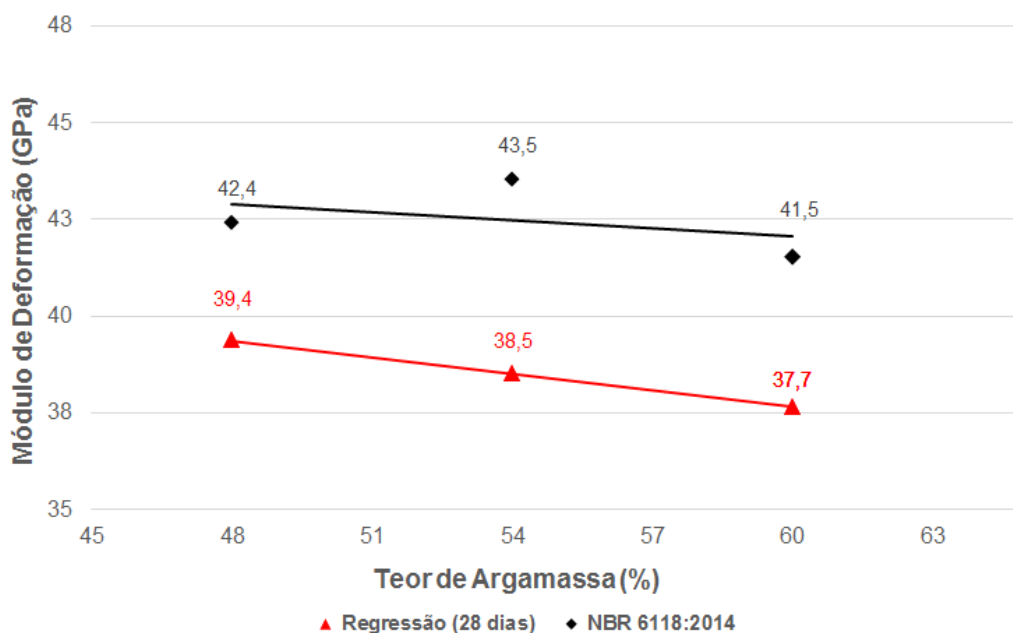


Figura 90 - Teor de Argamassa: regressão *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

É possível constatar que essas equações possuem comportamento próximo ao paralelo, sendo que a NBR 6118 (ABNT, 2014) superestima os valores calculados. Destaca-se que o teor de argamassa de 54% tem valor deslocado na metodologia de cálculo via NBR 6118 (ABNT, 2014), pelo fato de apresentar resistência à compressão ligeiramente superior aos demais.

Isso pode indicar haver um teor de argamassa tal, que otimiza a relação agregado miúdo/graúdo com impacto sobre a resistência e o módulo.

Com base nos resultados da Tabela 62 é possível calcular o erro máximo absoluto, pela equação de regressão e via metodologia da NBR 6118 (ABNT, 2014). Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 62.

Tabela 62 – Teor de Argamassa: erro relativo na determinação do módulo de deformação por meio da equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Determinação | Módulo de Deformação (GPa) | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|
| | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 |
| Teor de Argamassa | 48% | | | 54% | | | 60% | | |
| Regressão | 39,4 | | | 38,5 | | | 37,7 | | |
| NBR 6118:2014 | 42,4 | | | 43,5 | | | 41,5 | | |
| Erro (%) | -7,61 | | | -12,9 | | | -10,0 | | |

O erro máximo absoluto observado entre os valores calculados pela equação de regressão em comparação com a NBR 6118 (ABNT, 2014) é de 12,9%.

5.3.3 Comparação com outros modelos propostos

A comparação com outros modelos propostos na literatura levou em consideração a utilização dos mesmos tipos de materiais, o agregado graúdo e a faixa de resistência à compressão.

Foi utilizada, ainda, a equação de regressão obtida para a idade de 28 dias. A descrição dos modelos propostos em outros estudos e aqui apresentados já foram mencionadas no item 3.3. Vale destacar que os modelos a serem comparados têm como parâmetro de entrada a resistência à compressão média ou característica, sendo assim foi procedida a correção conforme mencionado anteriormente.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 63.

Tabela 63 – Teor de Argamassa: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia

| Traço | | Traço (em massa) | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------------|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 |
| Teor de Argamassa (%) | | 48 | | | 54 | | | 60 | | |
| f_{cm} (MPa) | | 53,9 | 57,4 | 50,2 | 58,0 | 56,7 | 52,8 | 55,7 | 53,4 | 47,9 |
| f_{ck} (MPa) | | 47,3 | 50,8 | 43,6 | 51,4 | 50,1 | 46,2 | 49,1 | 46,8 | 41,3 |
| E_{cs} (GPa) Regressão 28 dias | | 39,4 | | | 38,5 | | | 37,7 | | |
| Modelo | | Módulo de Deformação (GPa) | | | | | | | | |
| Dal Molin e Monteiro (1996) | Individual | 31,6 | 32,3 | 30,8 | 32,5 | 32,2 | 31,4 | 32,0 | 31,5 | 30,3 |
| | Média | 31,6 | | | 32,0 | | | 31,3 | | |
| Barbosa (2009) | Individual | 46,4 | 47,9 | 44,8 | 48,1 | 47,6 | 45,9 | 47,2 | 46,2 | 43,7 |
| | Média | 46,4 | | | 47,2 | | | 45,7 | | |
| Kummer (2016) | Individual | 34,9 | 35,5 | 34,2 | 35,6 | 35,3 | 34,7 | 35,2 | 34,8 | 33,8 |
| | Média | 34,8 | | | 35,2 | | | 34,6 | | |

O modelo proposto por Barbosa (2009) conduz a valores superiores para o módulo de deformação, quando comparado aos demais, incluindo a equação de regressão, a qual tem como parâmetro de entrada, o teor de argamassa. Já os valores apresentados por Dal Molin e Monteiro (1996) e Kummer (2016) apresentam valores inferiores ao modelo de regressão.

Destaca-se que o modelo proposto por Dal Molin e Monteiro (1996) conduz aos menores valores de módulo de deformação. A Figura 91 apresenta a distribuição dos resultados em função do teor de argamassa.

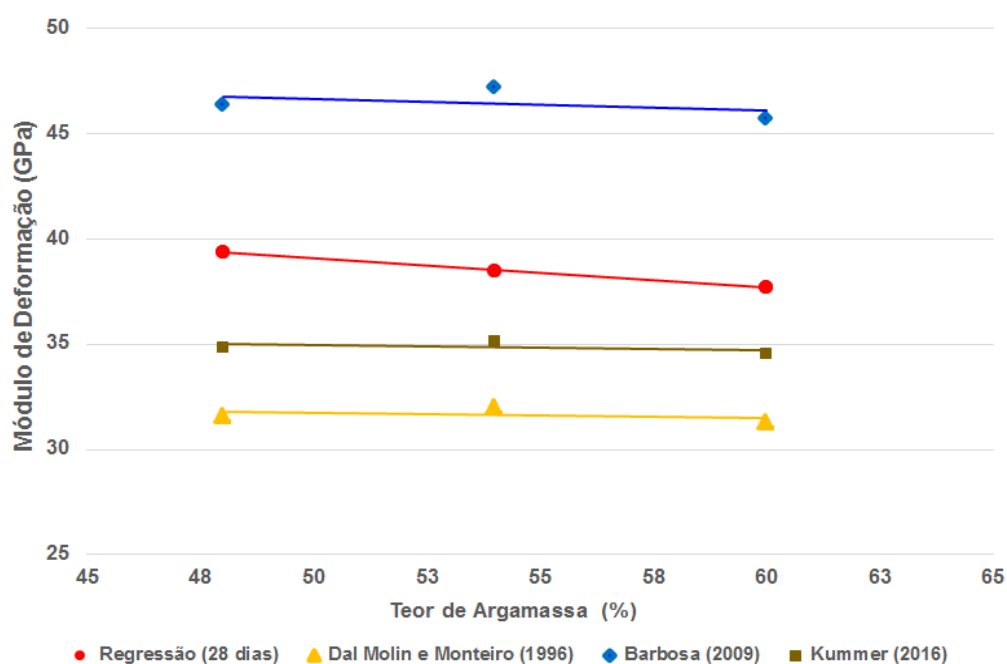


Figura 91 - Teor de Argamassa: regressão *versus* outros modelos propostos

A análise direta da Figura 91 apresenta a grande diferença entre os modelos, sendo que todos eles apresentam módulo de deformação praticamente constantes, à medida que se altera o teor de argamassa. Isso ocorre, pois o parâmetro de entrada dos modelos é apenas a resistência, que no estudo não obteve grandes variações por terem sido os concretos produzidos com a mesma relação água/cimento.

5.4 TIPO DE AGREGADO GRAÚDO

Os resultados referentes à resistência à compressão e módulo de deformação para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias, juntamente com os índices

determinados para os três (03) tipos de agregados graúdos, estão apresentados na Tabela 64.

Tabela 64 – Tipo de Agregado Graúdo: resultados obtidos

| Traço (em massa) | | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | |
|--|---------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Tipo do Agregado Graúdo | | Granito | | | Basalto | | | Diabásio | | | |
| Consumo de cimento (kg/m ³) | | 551 | 393 | 305 | 551 | 393 | 305 | 551 | 393 | 305 | |
| Volume de pasta (%) | | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 | |
| Volume de agregado (%) | | 59,9 | 71,4 | 77,7 | 59,9 | 71,4 | 77,7 | 59,9 | 71,4 | 77,7 | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | | 125 | 180 | 70 | 130 | 190 | 75 | 155 | 215 | 75 | |
| Resistência à compressão (MPa) | 14 dias | 47,5 | 49,5 | 44,9 | 46,9 | 49,6 | 45,2 | 45,0 | 48,0 | 44,7 | |
| | 28 dias | 48,4 | 50,4 | 46,9 | 49,0 | 53,1 | 48,0 | 48,1 | 50,6 | 48,0 | |
| | 150 dias | 60,3 | 56,3 | 58,6 | 60,6 | 58,0 | 59,1 | 62,3 | 57,9 | 58,7 | |
| Módulo de deformação (GPa) | 14 dias | E _{cs} , médio | 24,1 | 27,0 | 27,4 | 26,9 | 30,9 | 33,6 | 32,6 | 36,0 | 37,1 |
| | | D.P. (GPa) | 0,81 | 0,83 | 1,00 | 1,33 | 2,26 | 1,17 | 0,60 | 0,76 | 0,78 |
| | | CV (%) | 3,36 | 3,07 | 3,65 | 4,94 | 7,31 | 3,48 | 1,84 | 2,11 | 2,10 |
| | 28 dias | E _{cs} , médio | 25,5 | 28,5 | 29,1 | 27,5 | 31,8 | 34,0 | 33,7 | 36,0 | 39,3 |
| | | D.P. (GPa) | 1,60 | 1,17 | 1,27 | 1,47 | 2,22 | 0,93 | 2,80 | 1,00 | 1,27 |
| | | CV (%) | 6,27 | 4,11 | 4,36 | 5,35 | 6,98 | 2,74 | 8,31 | 2,78 | 3,23 |
| | 150 dias | E _{cs} , médio | 28,9 | 32,0 | 32,9 | 30,2 | 34,2 | 35,8 | 38,0 | 39,5 | 42,4 |
| | | D.P. (GPa) | 0,61 | 1,46 | 0,61 | 0,60 | 0,67 | 0,93 | 2,91 | 1,35 | 0,64 |
| | | CV (%) | 2,11 | 4,56 | 1,85 | 1,99 | 1,96 | 2,60 | 7,66 | 3,42 | 1,51 |
| Taxa de Crescimento do E _{cs} (%) | 14 – 28 dias | 5,81 | 5,56 | 6,20 | 2,23 | 2,91 | 1,19 | 3,37 | 0 | 5,93 | |
| | Média | 5,86 | | | 2,11 | | | 3,10 | | | |
| | 14 – 150 dias | 19,9 | 18,5 | 20,1 | 12,3 | 10,7 | 6,55 | 16,6 | 9,72 | 14,3 | |
| | Média | 19,5 | | | 9,83 | | | 13,5 | | | |
| | 28 – 150 dias | 13,3 | 12,3 | 13,1 | 9,82 | 7,55 | 5,29 | 12,8 | 9,72 | 7,89 | |
| | Média | 12,9 | | | 7,55 | | | 10,1 | | | |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 64 é possível verificar que, para o mesmo traço, consumo de cimento, volume de pasta e de agregados, a resistência à compressão na idade de estudo é praticamente inalterada.

Pode ser verificado que à medida em que decresce o volume de pasta e o consumo de cimento Portland, o valor do módulo de deformação do concreto cresce, ou seja, no mesmo sentido do volume do agregado, independentemente do tipo de agregado graúdo e da idade de ensaio.

O granito apresenta a maior taxa de desenvolvimento do módulo de deformação, com a evolução da idade de ensaio. Esse agregado obteve crescimento médio de 19,5%, entre as idades de 14 dias e 150 dias, seguido do diabásio que obteve 13,5% no mesmo período.

Entre 28 dias e 150 dias, o comportamento se repete, tendo o granito obtido o maior crescimento (12,9%), seguido pelo agregado de diabásio (10,1%) e, por fim, a rocha de basalto (7,55%).

Merece ser destacado que a taxa de crescimento médio apresentada por essa variável de dosagem – tipo de agregado graúdo, é superior às demais estudadas.

A Figura 92 apresenta os efeitos das diferentes idades sobre o módulo de deformação.

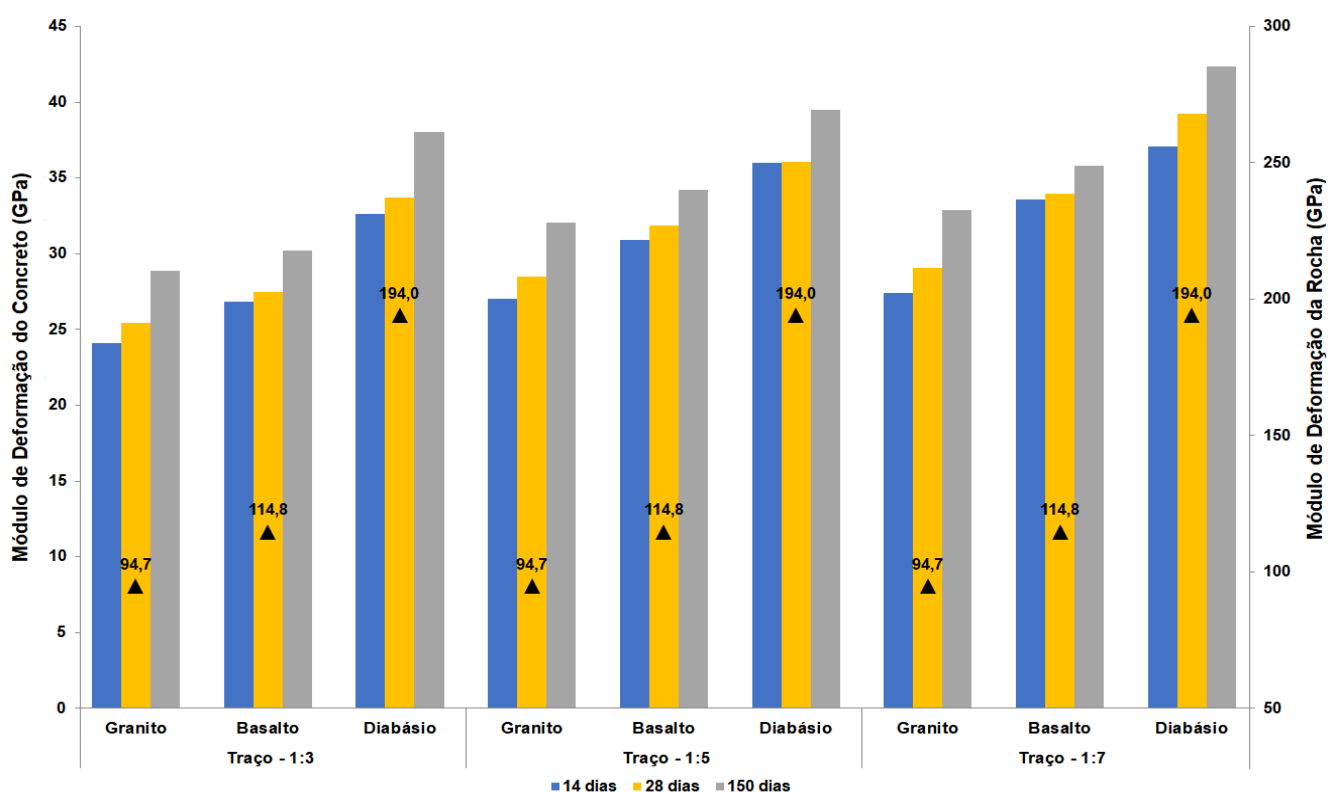


Figura 92 - Tipo de Agregado Graúdo: influência da idade no módulo de deformação

Ainda na Figura 92 é possível verificar que à medida em que cresce o módulo de deformação do agregado graúdo, cresce o valor de módulo do concreto em todas as situações. É necessário destacar que com a evolução da hidratação, há crescimento no valor do módulo do concreto para os três (03) tipos de agregado.

O valor do módulo do concreto é sempre superior quando utilizada a rocha diabásio, a qual tem módulo de deformação de 194 GPa; seguido pelo basalto com 114,8 GPa e por fim, pelo granito com 94,7 GPa. Esse efeito pode ser melhor visualizado na Figura 93.

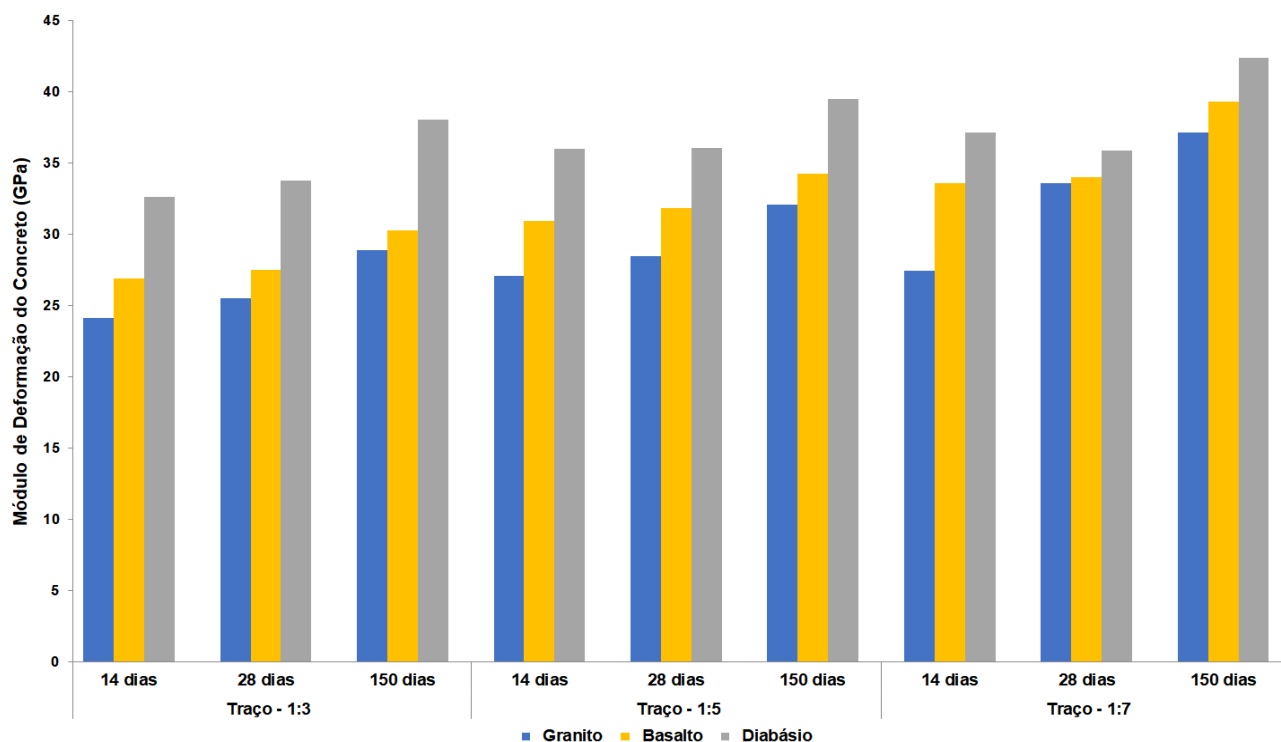


Figura 93 - Tipo de Agregado Graúdo: influência da rocha no módulo de deformação
Conforme já descrito na caracterização do material, o basalto e o granito têm resistências à compressão próximas, porém módulos de deformações distintos.

5.4.1 Análise de Variância

Para avaliar a influência do tipo de agregado graúdo e da idade de ensaio, assim como a interação dessas variáveis sobre o módulo de deformação, procedeu-se a análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise, considerando o nível de confiança de 95%, estão apresentados na Tabela 65.

Tabela 65 – Tipo de Agregado Graúdo: resultados da ANOVA

| Fator | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor "p" | Significância |
|-----------------------------------|---------|-----|--------|---------|-----------------|---------------|
| "Tipo do Agregado Graúdo" | 1067,81 | 2 | 533,91 | 82,98 | 0,000000 | S |
| "Idade" | 264,68 | 2 | 132,34 | 20,57 | 0,000000 | S |
| "Tipo do Agregado Graúdo x Idade" | 11,62 | 4 | 2,91 | 0,45 | 0,770905 | NS |
| Erro | 463,24 | 72 | 6,43 | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor "p" – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Os resultados da Tabela 65 indicam que o tipo de agregado graúdo e a idade de ensaio exercem influência significativa sobre o módulo de deformação do concreto. Por outro lado, a interação entre esses dois fatores não promove diferença significativa.

Com base nos comportamentos acusados pela análise de variância, foi realizado o Teste de Duncan, a fim de constatar as semelhanças entre os valores de módulo de deformação, conduzidos pelos diferentes tipos de agregado graúdo. A Tabela 66 apresenta os resultados do agrupamento de média.

Tabela 66 – Tipo de Agregado Graúdo: agrupamento de médias.

| "Tipo de Agregado Graúdo" | Grupo | E _{cs médio} (GPa) | Grupos Homogêneos | | |
|---------------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Granito | 1 | 28,374 | -- | 0,000123 | 0,000055 |
| Basalto | 2 | 31,659 | 0,000123 | -- | 0,000155 |
| Diabásio | 3 | 37,174 | 0,000055 | 0,000155 | -- |

É possível verificar, a partir da Tabela 66, que os diferentes tipos de agregado graúdo conduzem a valores distintos de módulo de deformação do concreto, não havendo semelhanças para dois tipos quaisquer de rocha.

O efeito do agrupamento de médias para a idade do ensaio sobre o valor do módulo de deformação é verificado nos resultados da Tabela 67.

Tabela 67 – Tipo de Agregado Graúdo: agrupamento de médias para a idade

| "Idade" (dias) | Grupo | E _{cs médio} (GPa) | Grupos Homogêneos | | |
|-------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 1 | 30,622 | -- | 0,121716 | 0,000055 |
| 28 | 2 | 31,704 | 0,121716 | -- | 0,000130 |
| 150 | 3 | 34,881 | 0,000055 | 0,000130 | -- |

Ao analisar o fator idade de ensaio é constatado que os resultados de módulo de deformação são similares entre as idades de 14 dias e 28 dias, ou seja, não há crescimento significativo. Em paralelo, pode-se assimilar que os crescimentos apresentados na Tabela 64, entre a idade de 14 dias e 150 dias e entre 28 dias e 150 dias são estatisticamente diferentes, ou seja, os crescimentos são significativos entre essas idades.

Dessa forma o efeito do agregado graúdo tem maior destaque com a evolução da hidratação, ou seja, em idades mais avançadas. Nas idades iniciais a pasta de cimento hidratada não dispõe de rigidez suficiente para transmitir os esforços para o agregado, e com a evolução da hidratação (tempo) há redução da porosidade com consequente aumento na rigidez, promovendo assim a transferência dos esforços para o agregado graúdo (MYERS, 2008; ALHADAS, 2008; MEHTA E MONTEIRO, 2014).

5.4.2 Equação de regressão

Para a representação das equações de regressão não é possível validar como dado de entrada o tipo de agregado graúdo. Dessa forma as equações serão fornecidas com base no volume de agregado ocupado na mistura. Vale ressaltar que este comportamento é visualizado para relação água/cimento e teor de argamassa fixos.

Nas Figuras 94, 95 e 96 estão apresentados os comportamentos dos diferentes tipos de agregado graúdo, respectivamente, aos 14 dias, 28 dias e 150 dias.

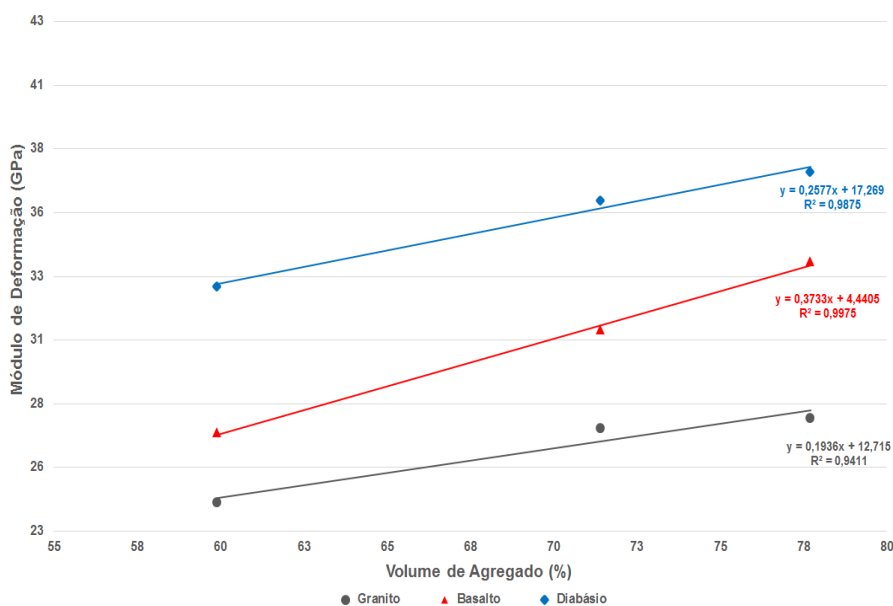


Figura 94 - Tipo de Agregado Graúdo: regressão para o módulo de deformação aos 14 dias

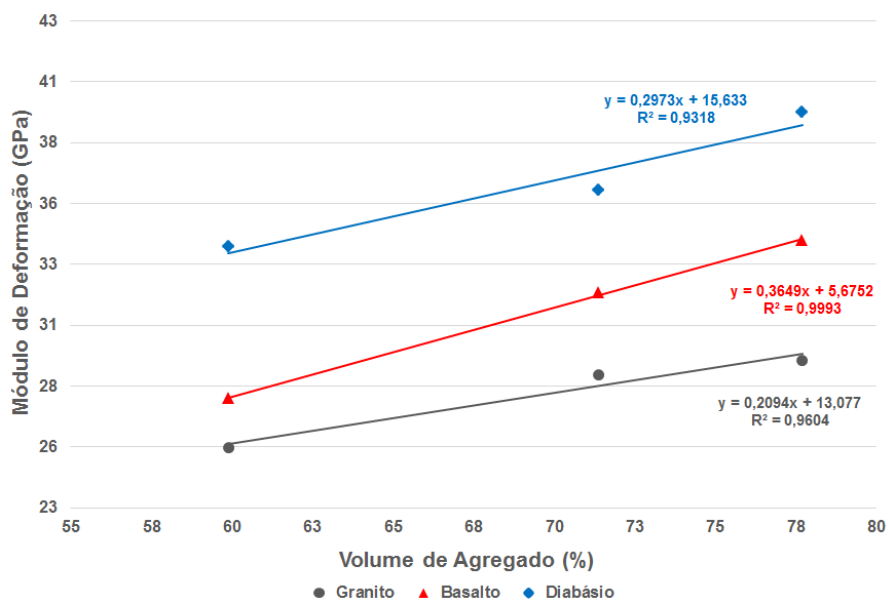


Figura 95 - Tipo de Agregado Graúdo: regressão para o módulo de deformação aos 28 dias

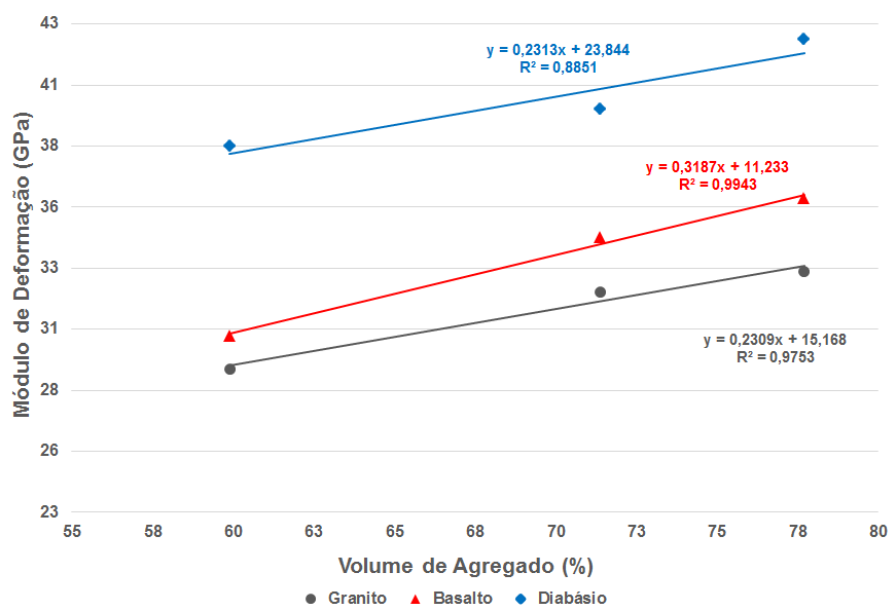


Figura 96 - Tipo de Agregado Graúdo: regressão para o módulo de deformação aos 150 dias. É possível verificar que o comportamento é praticamente linear entre o volume de agregado e o módulo de deformação, em cada tipo de rocha. À medida em que aumenta o volume de agregado na mistura, ocorre a elevação no valor do módulo do concreto.

Os coeficientes de determinação indicam a forte correlação existente entre o módulo de deformação do concreto e o volume de agregado graúdo, fixando a resistência à compressão, o teor de argamassa e o tipo do agregado graúdo.

Para efeito de comparação estão apresentados na Tabela 68 os resultados obtidos pelas equações de regressão (28 dias) e os estimados pelo modelo teórico da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 68 – Tipo de Agregado Graúdo: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Traço (em massa) | Agregado Graúdo | | Resistência à compressão (MPa) | | Módulo de Deformação (GPa) | | |
|---------------------|-----------------|----------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------|
| | Volume (%) | Tipo | Média (f_{cm}) | Característica (f_{ck}) | Experimental | Regressão (28 dias) | NBR 6118 (2014) |
| 1:3 | 59,9 | Granito | 48,4 | 41,8 | 25,5 | 25,6 | 32,7 |
| 1:5 | 71,4 | | 50,4 | 43,8 | 28,5 | 28,0 | 33,7 |
| 1:7 | 77,7 | | 46,9 | 40,3 | 29,1 | 29,5 | 32,0 |
| 1:3 | 59,9 | Basalto | 49,0 | 42,4 | 27,5 | 27,5 | 39,6 |
| 1:5 | 71,4 | | 53,1 | 46,5 | 31,8 | 31,7 | 42,0 |
| 1:7 | 77,7 | | 48,0 | 41,4 | 34,0 | 34,0 | 39,1 |
| 1:3 | 59,9 | Diabásio | 48,1 | 41,5 | 33,7 | 33,4 | 39,1 |
| 1:5 | 71,4 | | 50,6 | 44,0 | 36,0 | 36,9 | 40,6 |
| 1:7 | 77,7 | | 48,0 | 41,4 | 39,3 | 38,7 | 39,1 |

Os resultados da Tabela 68 mostram que a equação de regressão e os valores obtidos experimentalmente apresentam grande afinidade, justificando assim o alto coeficiente de determinação. Entretanto, os valores calculados com base na NBR 6118 (ABNT, 2014) tem grande amplitude de variação, ao serem comparados com a equação de regressão para os 28 dias.

As Figuras 97, 98 e 99 apresentam o comportamento dos dados, respectivamente aos agregados de granito, basalto e diabásio.

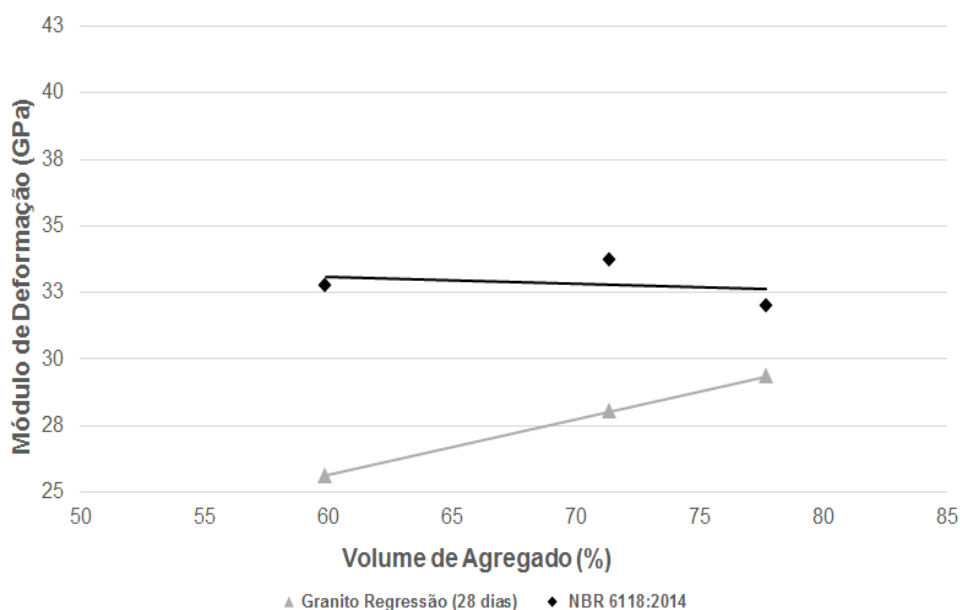


Figura 97 - Granito: regressão *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

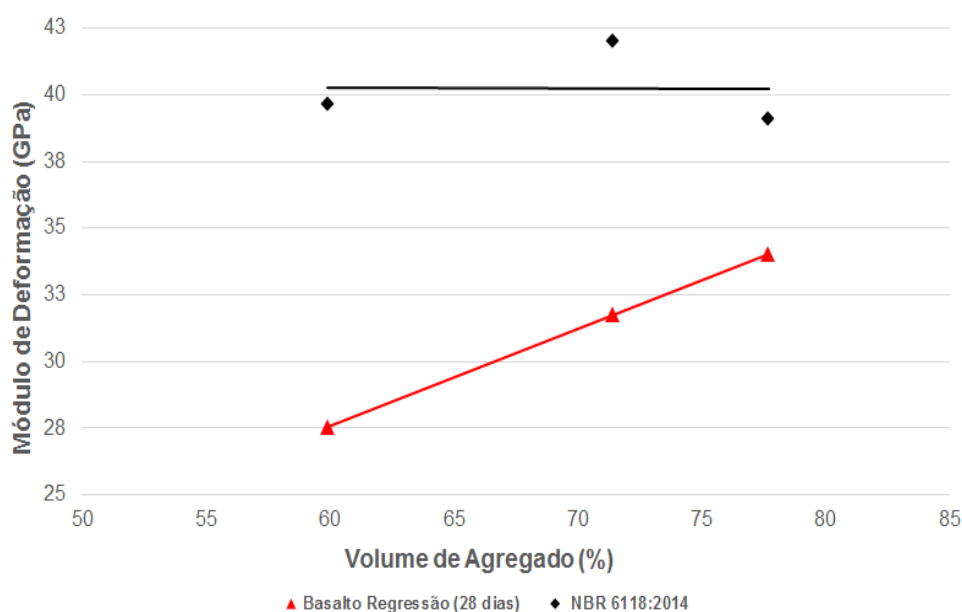


Figura 98 - Basalto: regressão *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

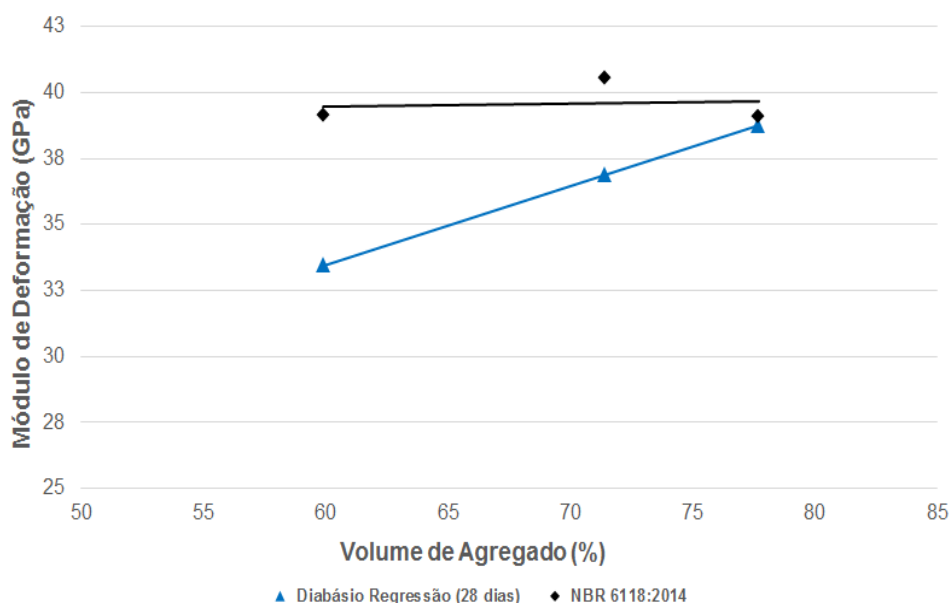


Figura 99 - Diabásio: regressão *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

As figuras apresentadas permitem observar que o módulo de deformação obtido via equações de regressão são inferiores aos estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Entretanto, com o aumento do volume de agregado na mistura, há redução da diferença entre os valores de módulo para todos os tipos de agregados. Assim, é claro o efeito do volume de agregado sobre o valor do módulo de deformação.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta como dado de entrada na equação para estimativa do módulo de deformação do concreto, fatores de correção, em função do tipo de agregado graúdo. Diante dos resultados obtidos experimentalmente, foram recalculados esses fatores. Os resultados da análise estão apresentados na Tabela 69.

Tabela 69 – Tipo de Agregado Graúdo: determinação do fator de correção

| Traço (em massa) | Agregado Graúdo | Módulo de Deformação Experimental (GPa) | Coeficiente de correção | | |
|---------------------|--------------------|--|-------------------------|---------------|-------|
| | | | NBR 6118 (2014) | Experimentais | |
| | | | | Individuais | Média |
| 1:3 | Granito | 25,5 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 1:5 | | 28,5 | | 1,00 | |
| 1:7 | | 29,1 | | 1,00 | |
| 1:3 | Basalto | 27,5 | 1,20 | 1,08 | 1,12 |
| 1:5 | | 31,8 | | 1,12 | |
| 1:7 | | 34,0 | | 1,17 | |
| 1:3 | Diabásio | 33,7 | 1,20 | 1,32 | 1,31 |
| 1:5 | | 36,0 | | 1,26 | |
| 1:7 | | 39,3 | | 1,35 | |

A NBR 6118 (ABNT, 2014) fixa o mesmo coeficiente para o basalto e diabásio em 1,2, tendo o granito como referência (1,00). Diante dos resultados apresentados na Tabela 73 é possível verificar que aos 28 dias o basalto apresenta valor médio superior a 12%, quando comparado com o granito; e quando comparado com o diabásio é de 31%.

Por outro lado, é possível verificar que há uma diferença de 19% entre os valores do basalto e diabásio, ou seja, os coeficientes de correção para essas rochas são diferentes, indicando haver inconsistência no proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

5.4.3 Comparação com outros modelos propostos

A comparação com outros modelos propostos na literatura levou em consideração a faixa de resistência à compressão e o tipo de agregado utilizado. Para efeito de comparação foi utilizada a equação de regressão dos agregados graúdos na idade de 28 dias.

Já a descrição das equações para os autores aqui apresentados, já foram mencionadas no item 3.3. Os resultados obtidos estão explorados nas Tabelas 70, 71 e 72, respectivamente para o granito, o basalto e o diabásio.

Tabela 70 – Granito: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia

| Grandeza | Traço (em massa) | | |
|-------------------------------------|----------------------------|------|------|
| | 1:3 | 1:5 | 1:7 |
| <i>a/c</i> | 0,409 | | |
| Volume de Agregado (%) | 59,9 | 71,4 | 77,7 |
| f_{cm} (MPa) | 48,4 | 50,4 | 46,9 |
| f_{ck} (MPa) | 41,8 | 43,8 | 40,3 |
| E_{cs} (GPa) Regressão 28 dias | 25,6 | 28,0 | 29,5 |
| Modelo | Módulo de Deformação (GPa) | | |
| Pacheco (2006) | 37,6 | 38,3 | 37,0 |
| Martins (2008) | 29,8 | 30,1 | 29,5 |
| Cabral (2014) | 30,9 | 30,9 | 30,9 |
| Bilesky (2016) | 32,8 | 33,4 | 32,3 |

O dado de entrada para o modelo proposto pelos autores para o granito, normalmente é a resistência à compressão média ou característica, com exceção do modelo proposto por Cabral (2014), o qual utiliza a relação água/cimento.

Diante dos resultados obtidos é possível verificar que o modelo proposto para o granito conduz a valores inferiores ao determinado pelas diferentes equações.

O modelo apresentado por Pacheco (2006) conduz aos maiores valores de módulo de deformação, dentre todos os analisados. A Figura 100 apresenta o comportamento das equações que consideram como agregado graúdo o granito.

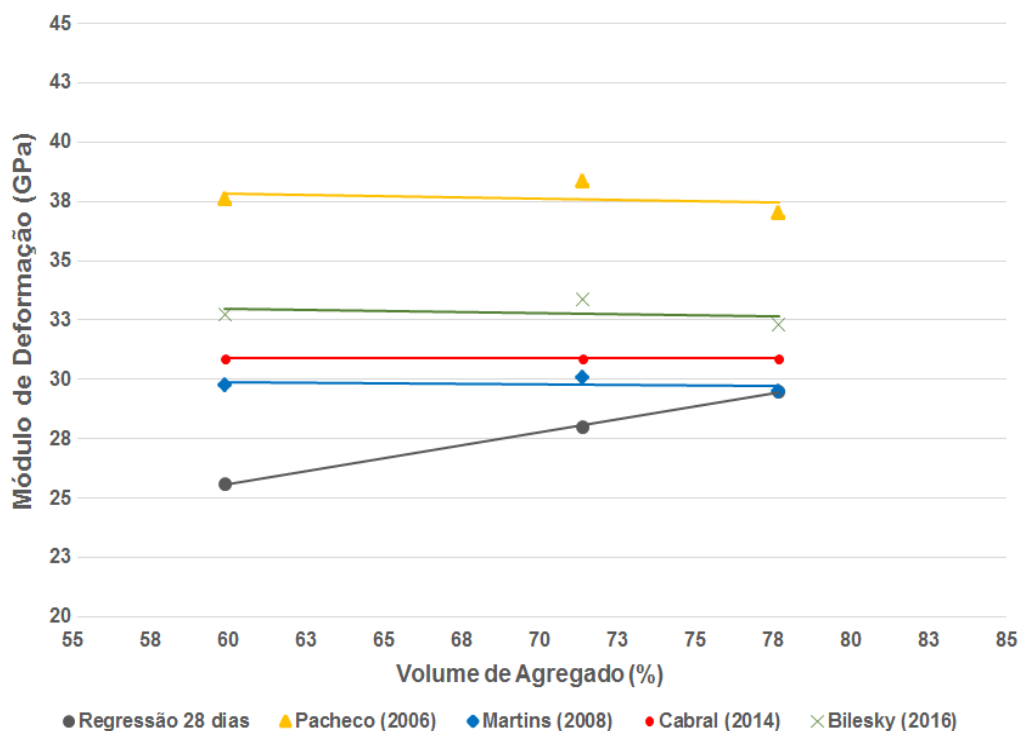


Figura 100 - Granito: equação de regressão *versus* modelos propostos na bibliografia

Na verificação das equações para o basalto é constatado que o modelo proposto por Barbosa (2009) superestima os valores do módulo de deformação. Os resultados da análise constam na Tabela 71.

Tabela 71 – Basalto: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia

| Grandeza | Traço (em massa) | | |
|-------------------------------------|----------------------------|------|------|
| | 1:3 | 1:5 | 1:7 |
| a/c | 0,409 | | |
| Volume de Agregado (%) | 59,9 | 71,4 | 77,7 |
| f_{cm} (MPa) | 49,0 | 53,1 | 48,0 |
| f_{ck} (MPa) | 42,4 | 46,5 | 41,4 |
| E_{cs} (GPa) Regressão 28 dias | 27,5 | 31,7 | 34,0 |
| Modelo | Módulo de Deformação (GPa) | | |
| Dal Molin e Monteiro (1996) | 30,6 | 31,5 | 30,4 |
| Barbosa (2009) | 44,2 | 46,1 | 43,8 |
| Kummer (2016) | 34,0 | 34,7 | 33,8 |

Os modelos propostos na Tabela 71 tomam por base a resistência à compressão média ou característica, o que faz com que o comportamento acerca do módulo seja invariável. Já na equação de regressão proposta, ao fixar o tipo e aumentar o volume de agregado, acusa elevação no módulo de deformação do concreto. A Figura 101 ilustra a aplicação das equações sobre o módulo de deformação.

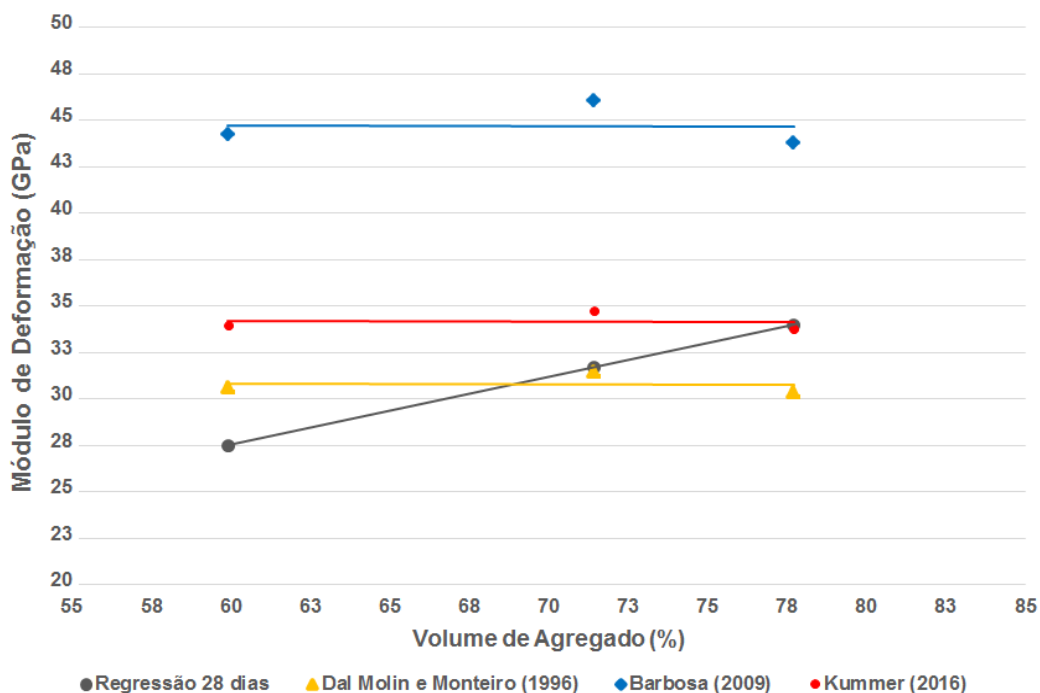


Figura 101 - Basalto: equação de regressão *versus* modelos propostos na bibliografia

Já para o diabásio a equação proposta por Bilesky (2016) credita a evolução do módulo à resistência à compressão, dispensando outros parâmetros. Assim, como os diferentes traços estudados têm a mesma relação água/cimento (resistência) a equação proposta pelo autor não sofre variações. Os resultados estão apresentados na Tabela 72.

Tabela 72 – Diabásio: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia

| Grandeza | Traço (em massa) | | |
|-------------------------------------|----------------------------|------|------|
| | 1:3 | 1:5 | 1:7 |
| a/c | 0,409 | | |
| Volume de Agregado (%) | 59,9 | 71,4 | 77,7 |
| f_{cm} (MPa) | 48,1 | 50,6 | 48,0 |
| f_{ck} (MPa) | 41,5 | 44,0 | 41,4 |
| E_{cs} (GPa) Regressão 28 dias | 33,4 | 36,9 | 38,7 |
| Modelo | Módulo de Deformação (GPa) | | |
| Bilesky (2016) | 36,9 | 37,8 | 36,9 |

O comportamento que ocorreu com o basalto, se repete para o diabásio. Em determinado momento, onde o volume de pasta é maior, a equação de regressão acusa valores inferiores para o módulo de deformação. Já, a partir de 73% de volume de agregado, apresenta valores superiores para o módulo de deformação do concreto. Esse efeito é visualizado na Figura 102.

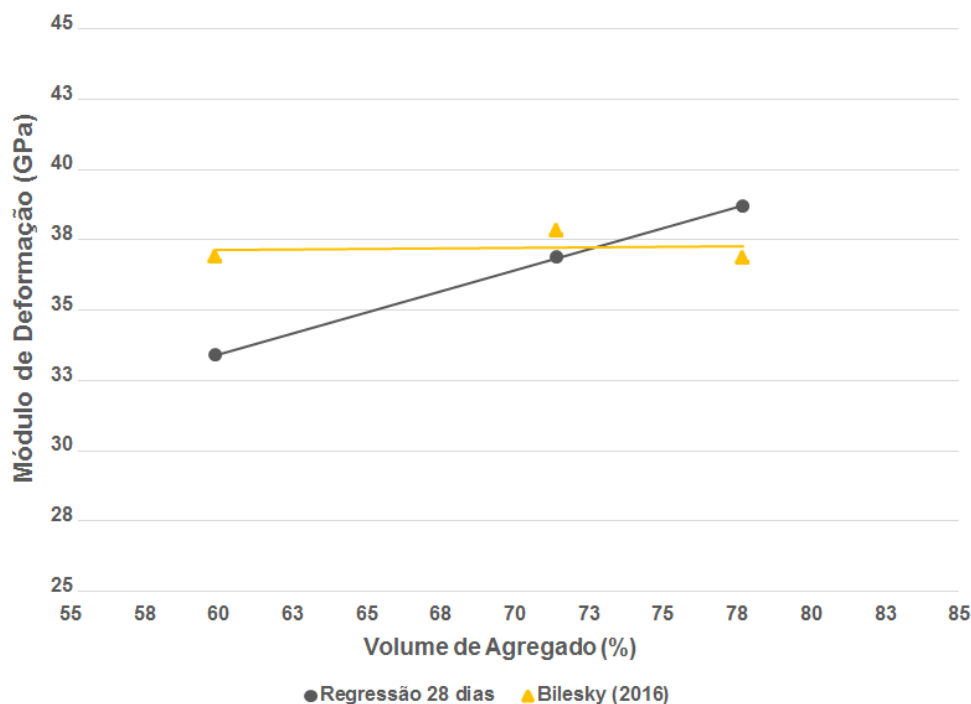


Figura 102 - Diabásio: equação de regressão *versus* modelos propostos na bibliografia. Diante das análises dos modelos propostos pelos autores citados, é possível afirmar que o módulo de deformação do concreto é indexado à resistência à compressão e aplicável a um tipo específico de agregado graúdo. Nenhuma das equações consultadas trabalha com o volume de agregado presente na mistura, devendo este ser um parâmetro à considerar.

5.5 TIPO DE CURA

A Tabela 73 apresenta os resultados referentes à resistência à compressão e módulo de deformação para as idades de 14 dias, 28 dias e 150 dias, juntamente com os índices determinados para os dois (02) tipos de cura.

Tabela 73 – Tipo de Cura: resultados obtidos

| Parâmetro | | Traço (em massa) | | | | | | | |
|--|--|------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 | | |
| Tipo de Cura | | Úmida | | | Vapor | | | | |
| Consumo de cimento (kg/m ³) | | 551 | 393 | 305 | 551 | 393 | 305 | | |
| Volume de pasta (%) | | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 | | |
| Volume de agregado (%) | | 59,9 | 71,4 | 77,7 | 59,9 | 71,4 | 77,7 | | |
| Abatimento pelo tronco de cone (mm) | | 135 | 190 | 75 | 135 | 190 | 75 | | |
| Resistência à compressão (MPa) | | 14 dias | 50,5 | 49,4 | 47,3 | 47,0 | 46,6 | 39,2 | |
| | | 28 dias | 58,0 | 56,7 | 52,8 | 50,7 | 51,7 | 45,5 | |
| | | 150 dias | 68,6 | 69,1 | 63,9 | 63,8 | 64,5 | 52,8 | |
| Módulo de deformação (GPa) | | 14 dias | E _{cs, médio} | 33,7 | 38,7 | 40,2 | 31,2 | 34,7 | 35,2 |
| | | | D.P. (GPa) | 2,66 | 0,61 | 0,68 | 0,83 | 0,97 | 2,37 |
| | | | CV (%) | 7,89 | 1,57 | 1,70 | 2,67 | 2,80 | 6,74 |
| | | 28 dias | E _{cs, médio} | 36,0 | 39,1 | 42,2 | 33,4 | 37,6 | 39,4 |
| | | | D.P. (GPa) | 0,29 | 0,67 | 0,75 | 1,36 | 0,72 | 1,96 |
| | | | CV (%) | 0,80 | 1,70 | 1,78 | 4,07 | 1,92 | 4,96 |
| | | 150 dias | E _{cs, médio} | 36,2 | 40,8 | 42,9 | 34,5 | 38,8 | 40,7 |
| | | | D.P. (GPa) | 0,93 | 1,07 | 2,43 | 1,92 | 1,40 | 1,61 |
| | | | CV (%) | 2,56 | 2,62 | 5,67 | 5,54 | 3,62 | 3,95 |
| Taxa de Crescimento do E _{cs} (%) | | 14 – 28 dias | 6,82 | 1,03 | 4,98 | 7,05 | 8,36 | 11,9 | |
| | | Média | 4,28 | | | 9,11 | | | |
| | | 14 – 150 dias | 7,42 | 5,43 | 6,72 | 10,6 | 11,8 | 15,6 | |
| | | Média | 6,52 | | | 12,7 | | | |
| | | 28 – 150 dias | 0,56 | 4,35 | 1,66 | 3,29 | 3,19 | 3,30 | |
| | | Média | 2,19 | | | 3,26 | | | |

Na Tabela 73 é possível verificar que os corpos de prova submetidos à cura a vapor possuem valores inferiores de resistência à compressão, independentemente da idade, traço estudado e do consumo de cimento Portland. O aumento do consumo de cimento Portland na mistura, provoca elevação do volume de pasta, o que conduz a redução no valor do módulo de deformação.

O módulo de deformação do concreto obtido por cura a vapor é inferior em todos os traços. A Figura 103 apresenta esse comportamento.

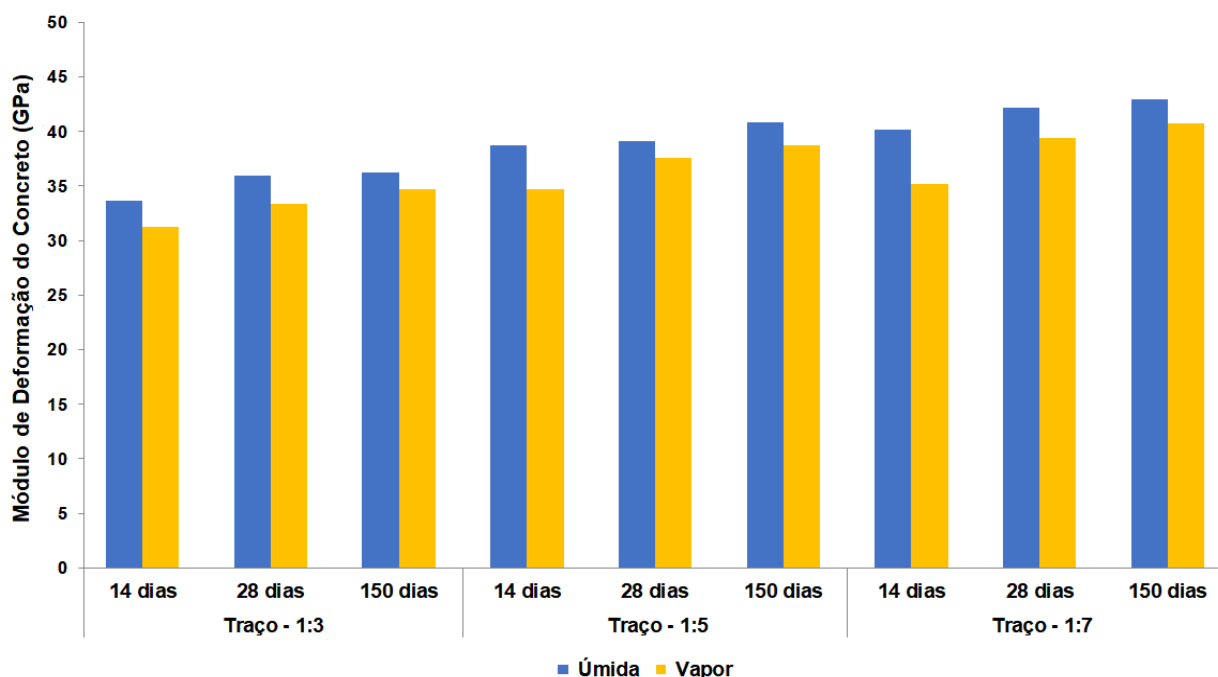


Figura 103 - Tipo de Cura: influência sobre o módulo de deformação

Ainda, na Figura 103 é possível verificar que para todas as idades o módulo de deformação do concreto apresenta valor inferior para a cura a vapor. A redução máxima observada foi de 14,2%. Kallel *et al.* (2017) salientam que o efeito da temperatura causa elevação da microfissuração na zona de transição e da porosidade do composto cimentício.

Entretanto, os valores de módulo de deformação do concreto obtidos através da cura a vapor têm maior taxa de crescimento à medida em que a hidratação evolui.

A taxa de desenvolvimento do módulo para a cura a vapor é praticamente o dobro do acusado na cura úmida. Destaca-se que entre as idades de 14 dias e 150 dias o módulo cresce em média 12,7% para a cura a vapor, enquanto que a cura úmida apresenta no mesmo período 6,52%. A Figura 104 apresenta o módulo de deformação em função da idade de ensaio.

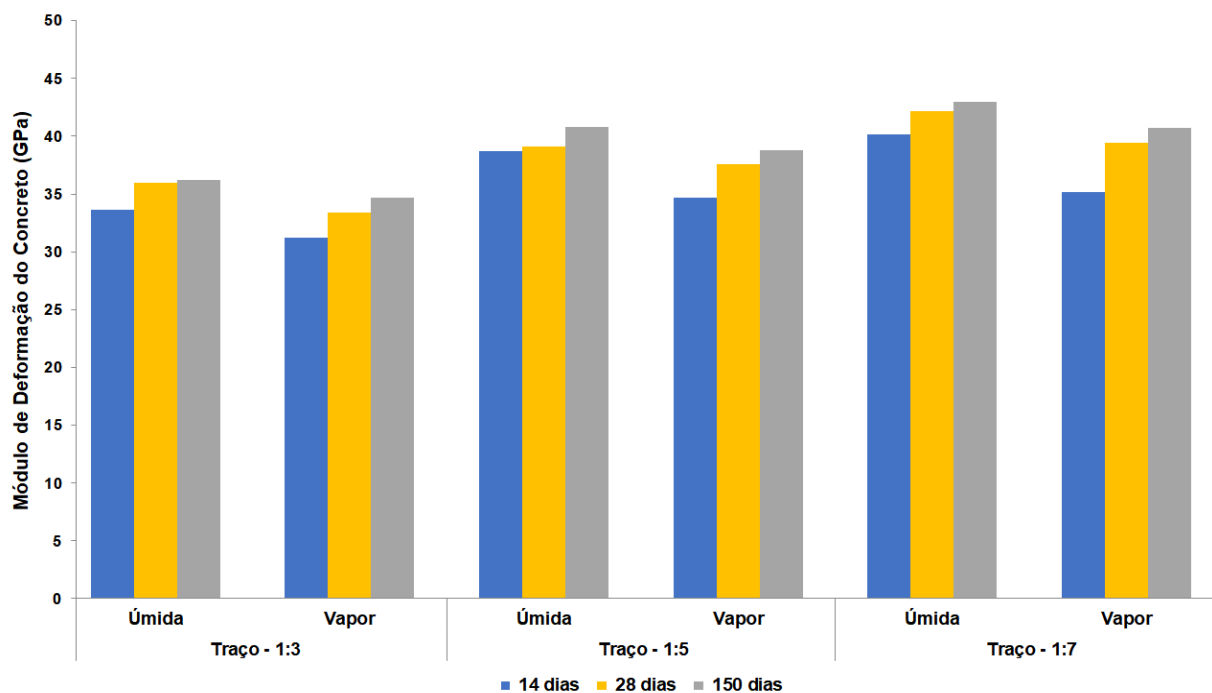


Figura 104 - Tipo de Cura: influência da idade sobre o módulo de deformação
Independentemente do tipo de cura utilizado, ocorre a elevação do módulo de deformação do concreto com a idade de ensaio.

5.5.1 Análise de Variância

Para avaliar a influência do tipo de cura e da idade de ensaio, assim como a interação entre esses fatores sobre o módulo de deformação, foi realizada a análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise, considerando o nível de confiança de 95%, estão apresentados na Tabela 74.

Tabela 74 – Tipo de Cura: resultados da ANOVA

| Fator | SQ | GDL | MQ | Teste F | Valor “p” | Significância |
|------------------------|--------|-----|-------|---------|-----------------|---------------|
| “Tipo de Cura” | 97,61 | 1 | 97,61 | 11,218 | 0,001584 | S |
| “Idade” | 110,22 | 2 | 55,11 | 6,334 | 0,003622 | S |
| “Tipo de Cura x Idade” | 8,92 | 2 | 4,46 | 0,513 | 0,602187 | NS |
| Erro | 417,65 | 48 | 8,70 | - | - | - |

Onde: SQ – Soma Quadrada; GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; Teste F – Valor Calculado de F; Valor “p” – Nível de significância associado ao valor calculado de F; S – Significativo, NS – Não significativo.

Através dos resultados obtidos na Tabela 74 é possível verificar que o tipo de cura e a idade de ensaio têm influência significativa sobre o valor do módulo de deformação. Entretanto, a interação entre esses fatores indica não haver diferença significativa do valor do módulo de deformação.

Dessa forma foi realizado o agrupamento de médias para cada idade, afim de constatar, por meio do teste de Duncan, quais resultados são considerados homogêneos, ou seja, similares. A Tabela 75 apresenta os resultados do agrupamento de média para o teor de argamassa.

Tabela 75 – Tipo de Cura: agrupamento de médias pelo teste de Duncan para a idade

| "Idade" (dias) | Grupo | E _{cs médio} (GPa) | Grupos Homogêneos | | |
|-------------------|-------|--------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| 14 | 1 | 35,600 | -- | 0,021220 | 0,001567 |
| 28 | 2 | 37,944 | 0,021220 | -- | 0,278587 |
| 150 | 3 | 39,022 | 0,001567 | 0,278587 | -- |

Conforme apresentado na Tabela 75 é possível afirmar que os valores de módulo do concreto, obtidos aos 28 dias e aos 150 dias não possuem diferença significativa. Ao contrário do encontrado entre as idades de 14 dias e 28 dias e entre 14 dias e 150 dias, indicando, assim, que os crescimentos verificados são significativos.

5.5.2 Equação de regressão

Na determinação das equações de regressão foi considerado como variável de entrada dos modelos, o volume de pasta. Essa opção foi utilizada, pois não é possível estimar o valor do módulo de deformação do concreto a partir da variável – tipo de cura. As projeções das equações de regressão estão apresentadas nas Figuras 105 e 106, respectivamente, para cura úmida e cura a vapor.

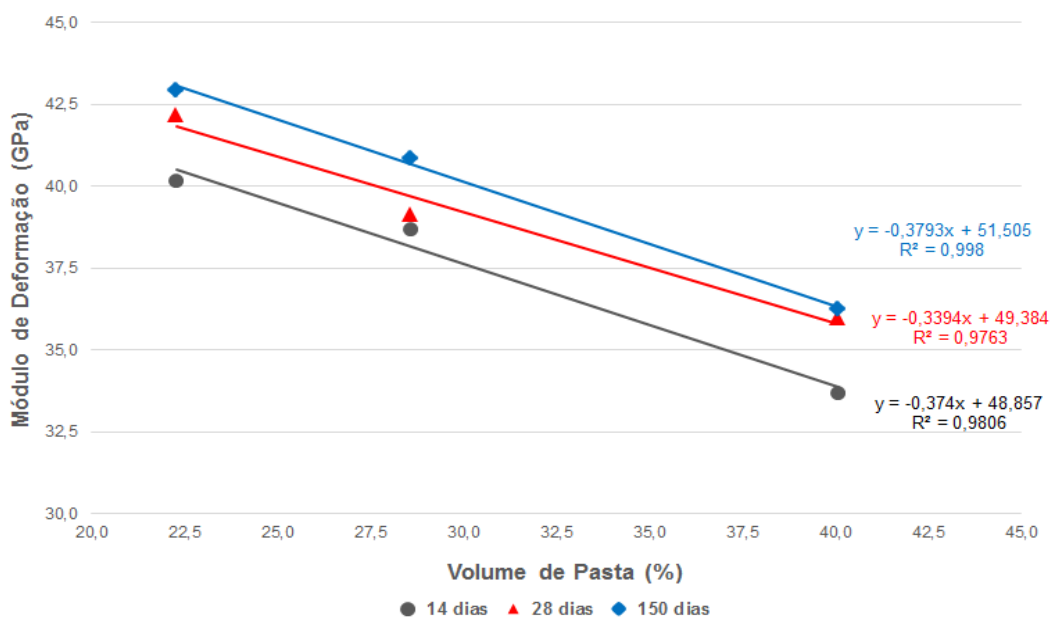


Figura 105 - Cura Úmida: regressão para o módulo de deformação

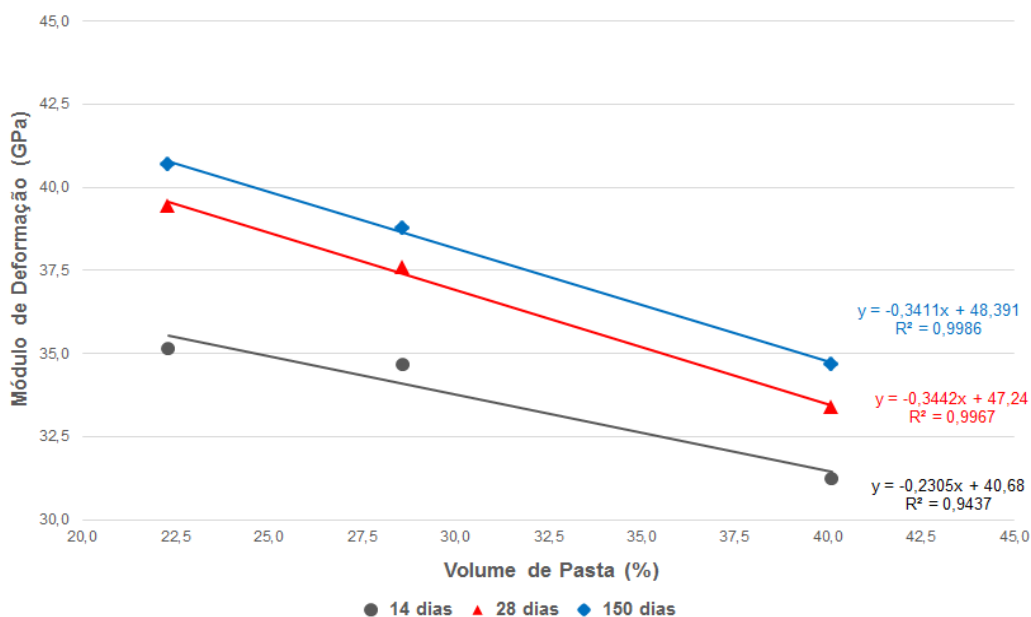


Figura 106 - Cura a Vapor: regressão para o módulo de deformação

O modelo que melhor representa os resultados obtidos para os dois tipos de cura é a regressão linear. O coeficiente de determinação indica a forte correlação existente entre o volume de pasta e o módulo de deformação do concreto, independentemente do tipo de cura e idade de ensaio. Salienta-se que à medida em que o volume de pasta decresce, o modelo conduz à elevação do valor do módulo.

Para efeito de comparação estão apresentados na Tabela 76 os resultados obtidos pelas equações de regressão (28 dias) e os estimados pelo modelo teórico da NBR 6118 (ABNT, 2014).

Tabela 76 – Tipo de Cura: módulo de deformação obtido pela equação de regressão e pela NBR 6118 (ABNT, 2014)

| Traço (em massa) | Volume de pasta (%) | Tipo de Cura | Resistência à compressão (MPa) | | Módulo de Deformação (GPa) | | |
|---------------------|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------|
| | | | Média (f_{cm}) | Característica (f_{ck}) | Experimental | Regressão (28 dias) | NBR 6118 (2014) |
| 1:3 | 40,1 | Úmida | 58,0 | 51,4 | 36,0 | 35,8 | 44,7 |
| 1:5 | 28,6 | | 56,7 | 50,1 | 39,1 | 39,1 | 44,0 |
| 1:7 | 22,3 | | 52,8 | 46,2 | 42,2 | 42,2 | 41,8 |
| 1:3 | 40,1 | Vapor | 50,7 | 44,1 | 33,4 | 33,4 | 40,6 |
| 1:5 | 28,6 | | 51,7 | 45,1 | 37,6 | 37,4 | 41,2 |
| 1:7 | 22,3 | | 45,5 | 38,9 | 39,4 | 39,6 | 37,6 |

Com base nos resultados apresentados na Tabela 76 é possível verificar que a equação de regressão estima valores próximos aos obtidos experimentalmente, justificando assim o alto coeficiente de determinação. Entretanto, ao comparar os

valores obtidos pela expressão da NBR 6118 (ABNT, 2014) é constatada grande dispersão dos resultados, tanto para a equação de regressão proposta, quanto aos valores determinados experimentalmente. As Figuras 107 e 108 apresentam a comparação da NBR 6118 (ABNT, 2014) com a cura úmida e com a cura a vapor.

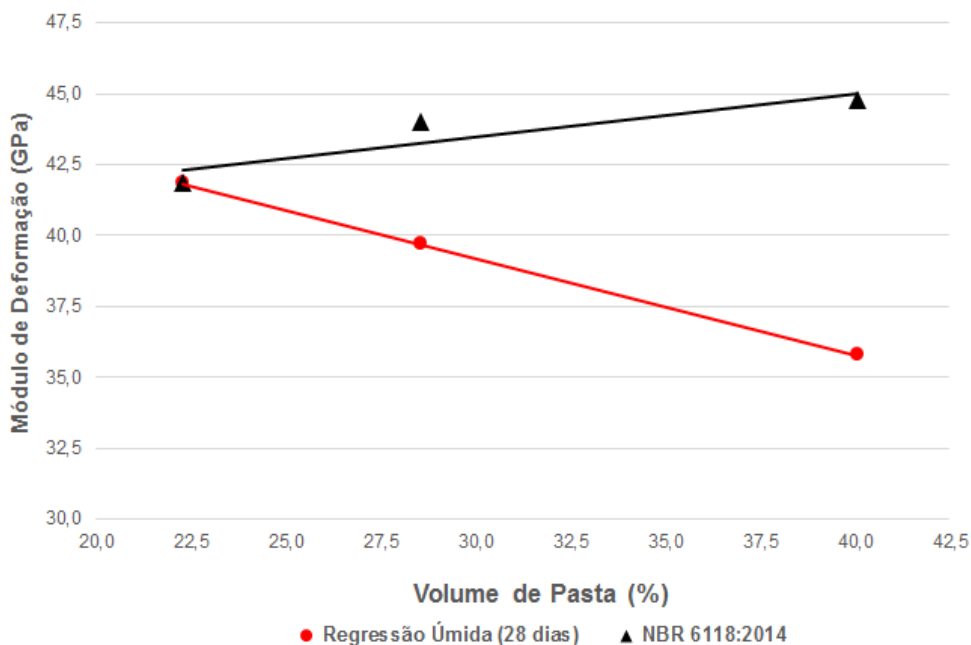


Figura 107 - Cura Úmida *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

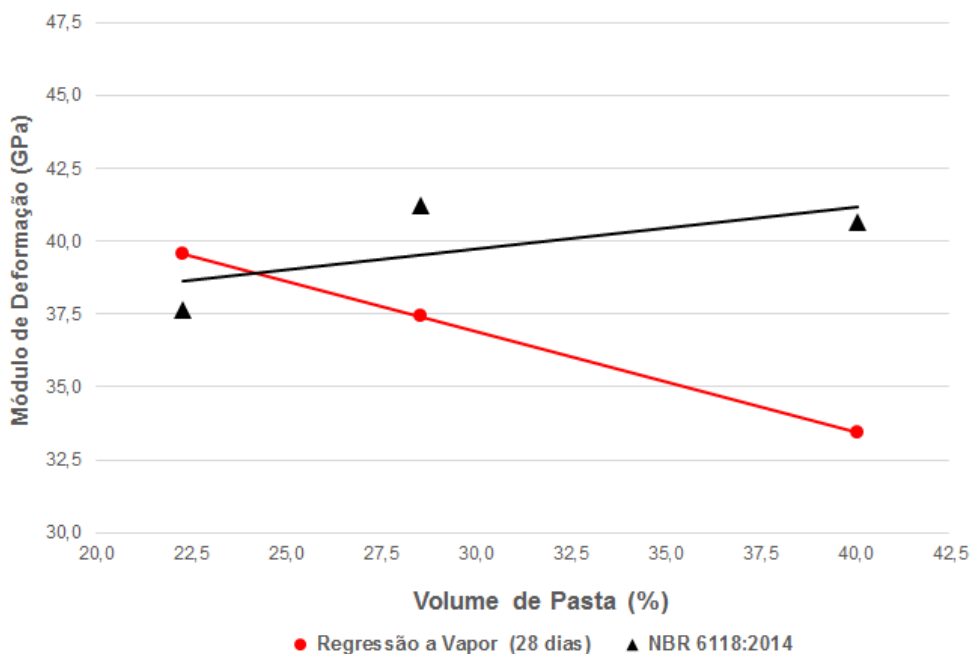


Figura 108 - Cura a Vapor *versus* NBR 6118 (ABNT, 2014)

É constatado em ambos os casos que à medida em que o volume de pasta aumenta, a diferença sobre o módulo de deformação cresce. Isso ocorre pois, o modelo matemático da NBR 6118 (ABNT, 2014) é indexado à resistência à compressão, sendo que para os concretos estudados a relação água/cimento foi fixada, definido assim um mesmo patamar de resistência para cada tipo de cura.

5.5.3 Comparação com outros modelos propostos

A comparação com outros modelos propostos na literatura levou em consideração a utilização dos mesmos tipos de materiais, o agregado graúdo e a faixa de resistência à compressão. Foram utilizadas as equações de regressão obtidas para a idade de 28 dias. A descrição dos modelos propostos em outros estudos, e aqui apresentados, já foi mencionada no item 3.3.

Os resultados obtidos da comparação com os modelos propostos na bibliografia estão apresentados na Tabela 77.

Tabela 77 – Tipo de Cura: comparação dos valores obtidos para o módulo de deformação por meio da equação de regressão com modelos da bibliografia

| Traço | 1:3 | 1:5 | 1:7 | 1:3 | 1:5 | 1:7 |
|-------------------------------------|----------------------------|------|------|-------|------|------|
| Tipo de Cura | Úmida | | | Vapor | | |
| f_{cm} (MPa) | 58,0 | 56,7 | 52,8 | 50,7 | 51,7 | 45,5 |
| f_{ck} (MPa) | 51,4 | 50,1 | 46,2 | 44,1 | 45,1 | 38,9 |
| Volume de pasta (%) | 40,1 | 28,6 | 22,3 | 40,1 | 28,6 | 22,3 |
| E_{cs} (GPa) Regressão 28 dias | 35,8 | 39,7 | 41,8 | 33,4 | 37,4 | 39,6 |
| Modelo | Módulo de Deformação (GPa) | | | | | |
| Dal Molin e Monteiro (1996) | 32,5 | 32,2 | 31,4 | 31,0 | 31,2 | 29,8 |
| Barbosa (2009) | 48,1 | 47,6 | 45,9 | 45,0 | 45,4 | 42,6 |
| Kummer (2016) | 35,6 | 35,3 | 34,7 | 34,3 | 34,9 | 33,3 |

Os dados apresentados na Tabela 77 mostram que a equação proposta por Barbosa (2009) conduz a valores superestimados de módulo de deformação. Já os modelos apresentados em Dal Molin e Monteiro (1991) e Kummer (2016) indicam valores inferiores aos estimados pelas equações de regressão. As Figuras 109 e 110 apresentam os comparativos realizados, respectivamente, para a cura úmida e cura a vapor.

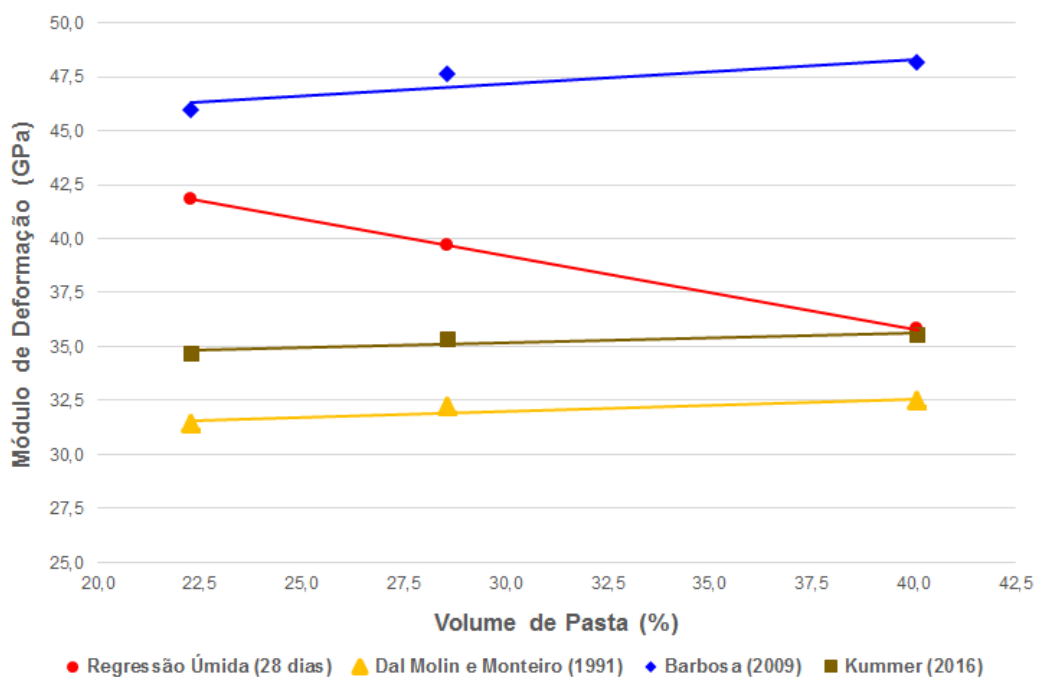


Figura 109 - Cura Úmida: equação de regressão *versus* outros modelos propostos

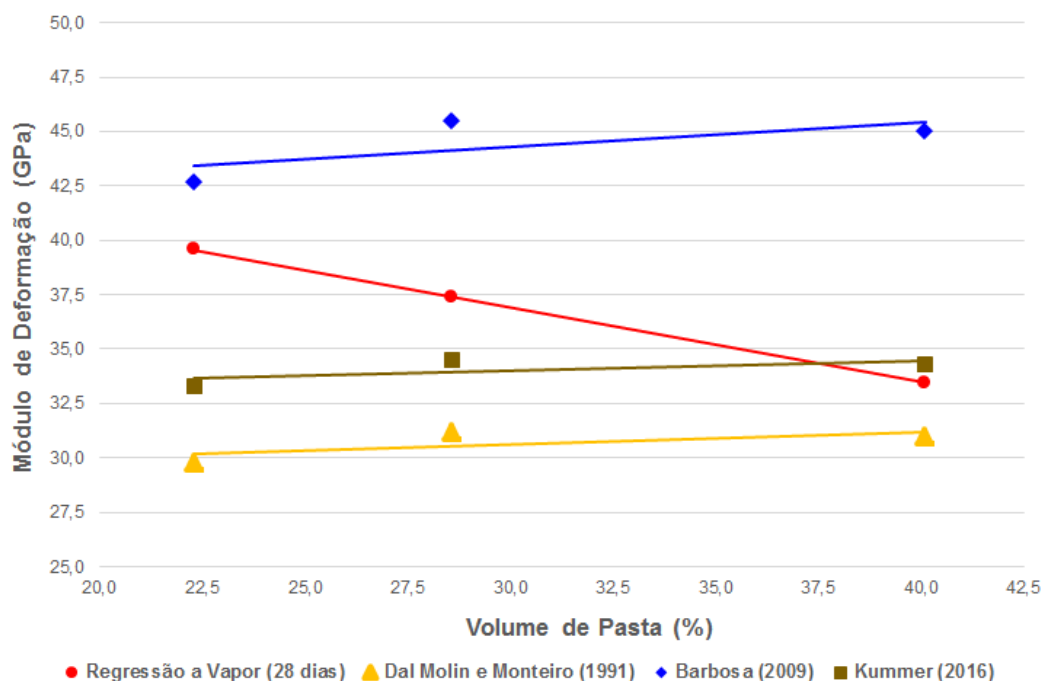


Figura 110 – Cura a Vapor: equação de regressão *versus* outros modelos propostos

Os modelos propostos indexam a estimativa do módulo de deformação à resistência à compressão média ou característica. Dessa forma, não consideram a redução do volume de pasta, que influencia diretamente o valor do módulo, em ambas formas de cura dos corpos de prova.

5.6 COMPARAÇÃO GERAL COM A PROPOSTA DA NBR 6118:2014

Com base nos resultados obtidos de módulo de deformação dos concretos utilizados no estudo, a Figura 111 apresenta o comparativo entre os valores experimentais e os determinados pela equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) em função da resistência característica à compressão aos 28 dias de idade.

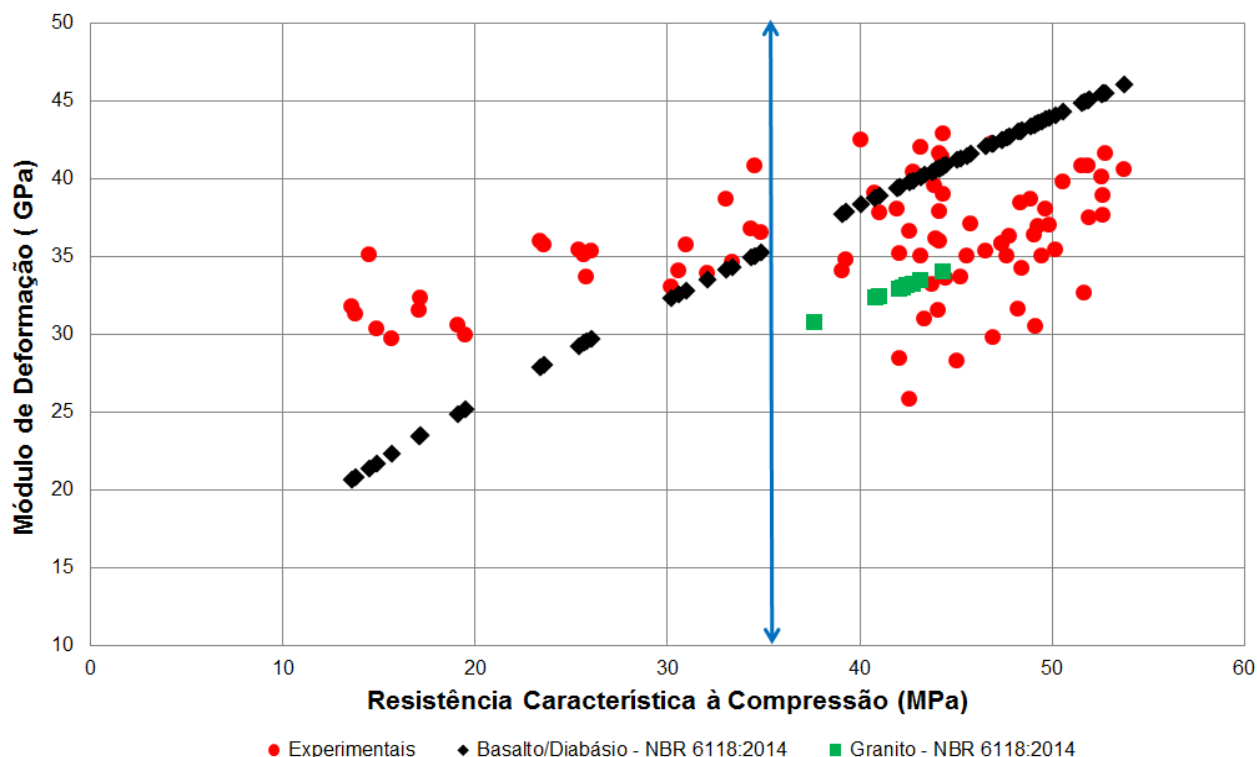


Figura 111 – Módulo de Deformação: valores experimentais e obtidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) Para os valores de módulo de deformação calculados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) são verificados dois alinhamentos na Figura 111. O primeiro, com valores superiores, trata-se dos concretos que utilizam como agregado graúdo de basalto e de diabásio, já a paralela inferior são os valores de módulo de deformação do concreto com agregado de granito.

É possível verificar que a equação prevista na NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta desenvolvimento crescente no valor do módulo com o aumento da resistência mecânica. Esse comportamento não é verificado nos valores experimentais. Assim, é possível afirmar que o módulo de deformação não é dependente apenas da resistência à compressão, como já visto anteriormente.

Ainda, a Figura 111 mostra que há resultados superiores aos estimados com base na referida norma e, outros inferiores. Os valores experimentais situam-se acima dos estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) até a resistência característica à compressão de 35 MPa. A partir dessa resistência mecânica, alguns valores experimentais de módulo de deformação estão acima do estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e, em outros casos, são inferiores aos obtidos pela aplicação da norma.

Assim, o indicativo é de que o modelo proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) não foi concebido com segurança para resistências características à compressão acima de 35 MPa.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar a influência de diferentes parâmetros de dosagem, de forma discretizada, sobre o módulo de deformação dos concretos de cimento Portland.

A motivação do estudo ocorreu em função da constatação de que resistências à compressão similares, levam a valores de módulo de deformação distintos, indicando haver mais fatores que afetam esse parâmetro, os quais muitas vezes são negligenciados. Foi fator de motivação, ainda, os constantes questionamentos que o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) feitos pela inconsistência de valores experimentais frente aos estimados pela equação propostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Deve ser ressaltado que diversos projetos estruturais podem estar sendo desenvolvidos com base apenas na estimativa do módulo por conta da aplicação da expressão proposta na NBR 6118 (ABNT, 2014), o que poderá estar determinando estruturas mais vulneráveis à deformação e à efeitos de segunda ordem.

6.1 CONCLUSÕES

As conclusões que podem ser tiradas do presente trabalho servem como orientação para projetos de traços que possam conduzir a obtenção dos valores de módulo admitidos em projeto estrutural. Conforme pode ser depreendido do trabalho realizado é possível concluir que:

- a) para uma mesma resistência o valor do módulo será maior quanto menor for o volume de pasta ou quanto maior o volume representado pelo esqueleto granular;
- b) a partir de determinados níveis de resistência, que para serem obtidos exigem maior consumo de cimento e, conseqüentemente, maior volume de pasta, o valor do módulo pode ser inferior àquele obtido com resistências menores (mais baixas);

- c) de uma maneira geral, os valores estimados divergem dos valores experimentais obtidos pelo desenvolvimento do presente trabalho. Os valores estimados pela proposta da NBR 6118 (ABNT, 2014) são superiores aos valores experimentais para resistência características à compressão a partir de 35 MPa;
- d) a elevação do valor do módulo é diretamente influenciada pelo aumento da resistência à compressão. Embora a relação seja direta e linear, o valor relativo no aumento do módulo é menor que o verificado na resistência;
- e) a utilização do teor de argamassa entre 48% e 60%, em massa, não conduz a variação significativa no valor do módulo de deformação;
- f) a natureza do agregado é fundamental na definição do módulo do concreto, sendo este diretamente afetado pelo módulo do agregado;
- g) os agregados de basalto e diabásio apresentam fatores de correção, respectivamente, no valor de 1,12 e de 1,31, ao adotar o granito como padronizado (1,00), sendo assim diferentes dos abordados na NBR 6118 (ABNT, 2014);
- h) a comparação realizada considerando dois tipos de cura indica haver diferença significativa, sendo menor o valor do módulo quando a cura é feita mediante aplicação de vapor;
- i) a idade de ensaio em todas as variáveis estudadas (volume de pasta, resistência à compressão, teor de argamassa, tipo de agregado gráudo e tipo de cura), apresenta efeito significativo sobre o valor do módulo de deformação do concreto.

É necessário frisar que em peças submetidas à flexão, deve ser considerada a possibilidade de serem empregados valores mais baixos de resistência à compressão, a fim de favorecer a elevação do módulo de deformação.

Também, considerando que o emprego de aditivos superplastificantes exercem o poder de reduzir a relação água/cimento é possível associar seu emprego à redução no volume de pasta, o que concorrerá para a elevação do módulo de deformação do concreto.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A escassez de trabalhos que estudam a influência das variáveis de dosagem sobre o módulo de deformação e pela difusão do melhor entendimento por parte da comunidade técnica, torna-se necessária outras pesquisas acerca deste assunto. Assim é possível destacar alguns assuntos a serem abordados em propostas futuras:

- avaliar os efeitos de outros tipos de cimento Portland e agregados do país sobre o módulo;
- investigar a utilização de agregado miúdo oriundo da cominuição de rochas;
- analisar o impacto produzido no dimensionamento estrutural e nos efeitos de segunda ordem, ao ser utilizado módulo de deformação inferior ao estimado;
- avaliar o uso de agregados graúdos de dimensão máxima característica, porém com módulo de finura distinto;
- investigar a interação entre os fatores abordados no presente trabalho;
- analisar a influência sobre o módulo de deformação ao ser utilizado agregado graúdo lamelar na produção do concreto;
- investigar a consequência da redução do módulo de deformação dos concretos submetidos à cura térmica/vapor.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABID, M. *et al.* **High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review.** Construction and Building Materials, Vol. 147, p. 339-351, 2017.
- ABO-QUDAIS, S. A. **Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves.** Construction and Building Materials, Vol. 19, p. 257-263, 2005.
- ABRAMS, D. A. **Bulletin 1: Design of Concrete Mixtures.** Chicago, Structural Materials Reserch Laboratory, Lewis Institute, 1918.
- AGUILAR, M. T. P. *et al.* **Análise da capacidade de deformação do concreto: Módulo de Young x Módulo de Deformação.** 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu/PR, p. 3672 - 3684, 2006.
- AİTCIN, P. C.; MEHTA, P. K. **Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete.** ACI Materials Journal, p. 103-107, 1990.
- AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELİK, T. **Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression.** Cement and Concrete Composites, Vol. 26, p. 633 - 638, 2004.
- ALHADAS, M. F. S. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. 126 fls. Belo Horizonte/MG, 2008.
- ALI, A. M.; FARID, B. J.; AL-JANABI, A. J. M. **Stress-Strain Relationship for Concrete in Compression Made of Local Materials.** Journal of King Abdulaziz University: Engineering Sciences, Vol. 2, p. 183 - 194, 1990.
- AL-ORAIMI, S.K.; TAHA, R.; HASSAN, H. F. **The effect of the mineralogya of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete.** Construction and Building Materials, Vol. 20, p. 499 – 503, 2006.
- ALSALMAN, A. *et al.* **Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete.** Construction and Building Materials, Vol. 153, p. 918 – 928, 2017.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318:** Building code requeriments for structural concrete. Farmington Hills: ACI, 2014.
- ARAÚJO, J. M. **Modelos de previsão do módulo de deformação longitudinal do concreto: NBR 6118 versus CEB.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº12, 2008.
- ARAÚJO, J. M. **O módulo de deformação longitudinal do concreto.** Teoria e Prática na Engenharia Civil, nº1, 2000.
- ARAÚJO, S. S; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L.B. **Influência do tipo de medição na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto.** Revista IBRACON Structures and Materials Journal, Vol. 5, n. 5, 2012.

ARRUDA, A. M. D. **Módulo de elasticidade de concretos produzidos com formações rochosas do triângulo mineiro**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. 166 fls. Uberlândia/MG, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 18**: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 22**: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 49**: Agregado miúdo – Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. **NBR 5751**: Materiais Pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5752**: Materiais Pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

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

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR ISO 7500-1**: Materiais Metálicos – Calibração e verificação de ensaio estático uniaxial. Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão – Calibração e verificação do sistema de medição de força. Rio de Janeiro, 2016.

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

_____. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 10341**: Agregado graúdo para concreto - Determinação do módulo de deformação estático e do diagrama tensão-deformação em rocha matriz – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 12826:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 16605:** Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

BAALBAKI, W. *et al.* **Influence of coarse aggregate on elastic properties of high- performance concrete.** ACI Materials Journal, p. 499-503, 1991.

BARBOSA, A. H. **Contribuição ao estudo sobre a obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. 203 fls. Recife/PE, 2010.

BARBOSA, A. H.; YANEZ, P. A. L.; CARNEIRO, A. M. P. **Contribuição à obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica.** Revista IBRACON Structures and Materials Journal, Vol. 4, n. 5, 2011.

BARBOSA, I. L. S. **Influência dos agregados graúdos da região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto.** Dissertação de Mestrado (Curso de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. 135 fls. Goiânia/GO, 2009.

BARBOSA, I. L. S.; GEYER, A. B. **Influência dos agregados graúdos da Região de Goiânia no módulo de deformação tangente inicial do concreto.** Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Fortaleza/CE, 2010.

BARBOSA, M. P. **Um estudo Experimental com Diferentes Tipos de Agregados Graúdos para a Verificação da Resistência Mecânica à compressão de Concreto de Elevado Desempenho.** Anais do 41º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Salvador/BA, 1999.

BAUER, E.; PEREIRA, C. H. A. F.; LEAL, A. C. F. S. **Valores do módulo de elasticidade de concretos comercial da região do Distrito Federal.** XIV ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Juiz de Fora/MG, 2012.

BAYAZIDI, A. M. *et al.* **Multigene genetic programming for estimation of elastic modulus od concrete.** Mathematical Problems in Engineering, p. 1-10, 2014.

BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Vale do Sinos. 83 fls. São Leopoldo/RS, 2012.

BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. **The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete.** Construction and Building Materials, Vol. 74, p. 132-139, 2015.

BEZERRA, A. C. **Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: Uma análise experimental e computacional.** Dissertação de Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. 151 fls. Belo Horizonte/MG, 2007.

BILESKY, P. C. **Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo. 137 fls. São Paulo/SP, 2016.

BORIN, L. A.; FALCÃO BAUER, R. J.; FIGUEIREDO, A. D. **Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade.** Revista Construindo, Vol. 4, nº 2, Belo Horizonte, 2012.

BRITISH STANDARD. **Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.** London: BSI, 2005.

BULLARD, J. W. *et al.* **Mechanisms of cement hydration.** Cement and Concrete Research, Vol. 41, p. 1208 – 1223, 2011.

CABRAL, L. **Análise comparativa do módulo de elasticidade calculado segundo diferentes normas.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. 67 fls. Recife/PE, 2014.

CABRAL, L.; MONTEIRO, E.; HELENE, P. **Análise comparativa do módulo de elasticidade calculado segundo diferentes normas.** Revista ALCONPAT, Vol. 4, n. 2, p. 144 – 160, 2014.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada.** Rio de Janeiro/RJ: LTC, 2ª ed., 2006.

CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; MACIEL, G. F. **Propriedades dos concretos autoadensáveis produzidos no Brasil.** V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais - HAC2018. Valência/Espanha, 2018.

CAMPOS, R. S. *et al.* **Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável.** Revista Matéria, Vol. 23, n.1, 2018.

CÂNDIDO, W. F.; BORGES, L. L.; BITTENCOURT, R. M. **Avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade do concreto quando submetido a carregamento permanente de longa duração.** Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Bento Gonçalves/RS, 2007.

- CANESSO, F. A. C. *et al.* **Módulo de elasticidade dinâmico e estático de concretos convencionais.** Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Bento Gonçalves/RS, 2007.
- CARRASQUILLO, R. L.; SLATE, F. O.; NILSON, A. H. **Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads.** ACI Journal, Vol. 78, p. 171-178, 1981.
- CASTRO, C. H. *et al.* **Determinação de módulo de elasticidade em um concreto de alto desempenho.** Anais do 41º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Salvador/BA, 1999.
- CHEN, H. *et al.* **Aggregate shape effect on the overestimation of ITZ thickness: Quantitative analysis of Platonic particles.** Powder Technology, Vol. 289, p. 1 – 17, 2016.
- COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **FIB Model Code.** Lausanne: CEB, 2010.
- COSTA, A. C. M.; PRADO, P. F. **Influência dos agregado graúdos do estado de Goiás no módulo de deformação do concreto.** Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Goiás. Anápolis/GO, 2001.
- COUTINHO, A. S., GONÇALVES, A. **Fabrico e Propriedades do Betão.** LNEC, Vol III, Lisboa/Portugal, 1994.
- CUI, H. Z.; *et al.* **Analytical model for compressive strength, elastic modulus and peak strain of structural lightweight aggregate concrete.** Construction and Building Materials, Vol. 36, p. 1036-1043, 2012.
- CUNHA, C. A. M. C. *et al.* **Estudo da resistência à compressão e módulo de elasticidade em concretos com diferentes traços.** Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Rio de Janeiro/RJ, 2006.
- CUPERTINO, M. A. L. *et al.* **Avaliação de fatores de ensaio que interferem nos resultados de módulo de elasticidade do concreto.** Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Bento Gonçalves/RS, 2007.
- CUPERTINO, M. A. L. *et al.* **Análise da influência da dimensão básica do corpo-de-prova no módulo de elasticidade.** Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Salvador/BA, 2008.
- DA SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. **Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia.** Revista Ambiente Construído, Vol. 8, p. 21 - 35, 2008.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao Estudo da propriedades mecânicas dos concreto de alta resistência com e sem adições de microssílica.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de São Paulo. 236 fls. São Paulo/SP, 1995.
- DAL MOLIN, D. C. C.; MONTEIRO, P. J. M. **Contribuição ao Estudo do módulo de deformação de concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica.** Boletim Técnico nº 159 – EPUSP, São Paulo/SP, 1996.

DAVRAZ, M. *et al.* **Pozzolanic effect of andesite waste powder on mechanical properties of high strength concrete.** Construction and Building Materials, Vol. 165, p. 494-503, 2018.

DE LARRARD, F. **Concrete optimization with regard to packing density and rheology.** 3rd RILEM International Symposium on Rheology of Cement Suspensions Such as Fresh Concrete. France. 8 fls, 2009.

DE MARCHI, R. D. *et al.* **Avaliação de parâmetros de dosagem para atendimento do módulo de deformação do concreto produzido em central dosadora.** Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Fortaleza/CE, 2010.

DE MARCHI, R. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à produção do material.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de São Paulo. 121 fls. São Paulo/SP, 2011.

DEL BOSQUE, I. F. S. *et al.* **Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate.** Cement and Concrete Composites, Vol. 81, p. 25-34, 2017.

DEL VISO, J. R.; CARMONA, J. R.; RUIZ, G. **Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 38, p. 386 - 395, 2008.

DIAMOND, S.; HUANG, J. **The ITZ in concrete – a different view based on image analysis and SEM observations.** Cement and Concrete Composites. Vol. 23, p.179–188, 2001.

DJANIKIAN FILHO, J. G. **Controle do módulo de elasticidade do concreto na estrutura com o uso de célula de fluência.** Monografia em MBA em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 78 fls. São Paulo/SP, 2010.

DONZA, H.; CABRERA, O.; IRASSAR, E. F. **High-strength concrete with different fine aggregate.** Cement and Concrete Research, Vol. 32, p. 1755-1761, 2002.

ESTOLANO, V. *et al.* **Avaliação dos módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto.** Revista Matéria, Vol. 23, n.1, 2018.

FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de Construção.** Rio de Janeiro/RJ: LTC, 1994.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M.; BEJA, I. A. **Agregados para a Construção Civil.** In: Isaia, G. C. (Ed.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo/SP, 2017.

FERRARI, A. A. **Propriedades mecânicas do concreto de elevado desempenho fabricado com diversos materiais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. 182 fls. Belo Horizonte/MG, 1995.

FONSECA, N.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. **The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste.** Cement and Concrete Composites, Vol. 33, p. 637-643, 2011.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de rochas na construção civil**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE). 1ª ed. São Paulo/SP, 2002.

FROTTÉ, C. *et al.* **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD**. Revista Matéria, Vol. 22, n. 2, 2017.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado a rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo/SP: PINI, 1997.

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. - **Relatórios dos Programas Interlaboratorial de Ensaios em Concreto Endurecidos**. 1999 a 2017.

GAGLIARDO, D. P.; VIDAL, P. A.; GAGLIARDO, J. C. **Influência da granulometria do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland**. Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Fortaleza/CE, 2010.

GANDOMI, A. H. *et al.* **New design equations for elastic modulus of concrete using multi expression programming**. Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 21, p. 761-774, 2015.

GEYER, A. L. B.; GREVEN, H. A. **Concreto com fôrmas drenantes**. Anais do Seminário Internacional: Avanços na Tecnologia do Concreto. Goiania/GO, 1999.

GHEBRAB, T.; SOROUSHIAN, P. **Development of Structure-Property Relationships for Concrete**. Journal of Advanced Concrete Technology – Japan Concrete Institute, Vol. 9, p. 5-14, 2011.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Universidade de São Paulo. 132 fls. São Carlos/SP, 2015.

GIRARDI, R. **Estudo da variabilidade do cimento Portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 167 fls. Porto Alegre/RS, 2014.

GOMES, P. C. C. **Estudo dos parâmetros que influenciam a produção e as propriedades dos concretos de alta resistência**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 1995.

GONZÁLEZ, J. S. *et al.* **Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams**. Construction and Building Materials, Vol. 149, p. 507-514, 2017.

GUIMARÃES, L. E.; SANTOS, D. R. D. **Avaliação do módulo de deformação do concreto em diferentes idades e com diferentes relações água/cimento**. Monografia de Especialização em Construção Civil. Universidade Federal de Goiás, 1999.

GUJEL, D. A.; KAZMIERCZAK, C. S.; MASUERO, J. R. **Diagrama tensão-deformação específica em concretos com agregados reciclados de**

concreto: análise da metodologia proposta pela NBR 8522. Revista IBRACON Structures and Materials Journal, Vol.10, n.3, 2017.

HAN, S. H.; KIM, J. K. **Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 34, p. 1219-1227, 2004.

HASHIN, Z.; MONTEIRO, P. J. M. **An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste.** Cement and Concrete Research, Vol. 32, p. 1291-1300, 2002.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto.** São Paulo/SP: Pini/Senai, 1993.

HELENE, P. R. L.; MONTEIRO, P. J. M. **Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy.** Materials and Structures, Vol. 26, nº.162, p.443-452, 1993.

HU, C.; LI, Z. **Micromechanical investigation of Portland cement paste.** Construction and Building Materials, Vol. 71, p. 44 - 52, 2014.

JACINTHO, A. E. P. G. A.; GIONGO, J. S. **Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. Cap. 20 – Resistência mecânica do concreto.** São Paulo/SP: Ed. G. C. Isaia, 1ª ed., Vol.1, 2005.

KALLEL, H. *et al.* **Effect of temperature and moisture on the instantaneous behaviour of concrete.** Cement and Concrete Composites, Vol. 80, p. 326-332, 2017.

KATAYAMA, D. **Estudo da influência da granulometria do agregado graúdo nas propriedades do concreto de alto desempenho.** Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. UTFPR. Campo Mourão/PR, 2016.

KLISZCZEWICZ, A.; AJDUKIEWICZ, A. **Differences in instantaneous deformability of HS/HPC according to the kind of coarse aggregate.** Cement and Concrete Composites, Vol. 24, p. 263-267, 2002.

KOCÁB, D. *et al.* **Development of the elastic modulus of concrete under different curing conditions.** Procedia Engineering, Vol. 195, p. 96-101, 2017a.

KOCÁB, D. *et al.* **Experimental analysis o the influence of concrete curing on the development of its elastic modulus over time.** Materials and Technology, Vol. 51, p. 657-665, 2017b.

KUMMER, L. M. **Resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos de uma central dosadora de concreto de Lajeado/RS.** Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. UNIVATES. Lajeado/RS, 2016.

L`HERMITE, R. **Ao pé do muro.** Taguatinga/DF: Ed.:Senai, 1970.

LAM, C.; JEFFERIS, S. A. **Critical assessment of pile modulus determination methods.** Canadian Geotechnical Journal, Vol. 48, p. 1433-1448, 2011.

LEAL, A. C. F. S. **Investigação experimental do módulo de elasticidade nos concretos produzidos em Brasília.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. 151 fls. Brasília/DF, 2012.

- LEE, K. M.; PARK, J. H. **A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone**. Cement and Concrete Research. Vol. 38, p. 396 – 402, 2008.
- LENZ, L. A. **Avaliação da influência do empacotamento do esqueleto granular no módulo de elasticidade de concretos convencionais**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Construção Civil). Universidade Federal do Paraná. 158 fls. Curitiba/PR, 2016.
- LI, G. *et al.* **Effective Young's modulus estimation of concrete**. Cement and Concrete Research, Vol. 29, p. 1455 – 1462, 1999.
- LI, G. **The effect of moisture content on the tensile strength properties of concrete**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). University of Florida, 2004.
- LIU, B. D.; LV, W. J.; LI, L.; LI, P. F. **Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete**. Construction and Building Materials, Vol. 69, p. 133 -142, 2014.
- LUTZ, M. P.; MONTEIRO, P. J. M.; ZIMMERMAN, R. W. **Inhomogeneous interfacial transition zone model for the bulk modulus of mortar**. Cement and Concrete Research, Vol. 27, p. 1113 – 1122, 1997.
- MALAIKAH, A. S. **A proposed relationship for the modulus of elasticity of high strength concrete using local materials in Riyadh**. College of Civil Engineering. King Saud University. Riyadh, Saudi Arabia, 2004.
- MANZANO, H.; DOLADO, J. S.; AYUELA, A. **Elastic properties of the main species present in Portland cement pastes**. Acta Materialia, Vol. 57, p. 1666 – 1674, 2009.
- MARTINS, D. G. **Influência do tamanho do corpo de prova nos resultados de ensaios de módulo de deformação e resistência à compressão e suas correlações para concretos produzidos em Goiânia – GO**. Dissertação (Curso de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO. 112 fls. Goiânia/GO, 2008.
- MARTINS, C. H.; MARCANTONIO, G. P. **Resistência simples à compressão e módulo de elasticidade do concreto produzidos com substituição parcial de agregado miúdo por resíduos plásticos**. Revista Mix Sustentável, Vol. 4, n.2, p. 123 – 130, 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo/SP: IBRACON, 2ª ed. (português), 2014.
- MELO NETO, A. A. D.; HELENE, P. R. L. **Módulo de elasticidade e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Belo Horizonte/MG, 2002.
- MONTEIRO, P. J. M.; CHANG, C. T. **The elastic moduli of calcium hydroxide**. Cement and Concrete Research, Vol. 25, p. 1605 - 1609, 1995.
- MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de São Paulo. 260 fls. São Paulo/SP, 2007.

MONTOYA, P. J.; MESEGUER, A.; CABRE, M. **Hormigon Armado**. Edición Basada em EHE ajustada al Código Modelo y al Eurocódig. Barcelona, 2000.

MYERS, J. J. **The use of high strength/high performance concrete in America: a code and application perspective**. Proceedings of the 8th International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete and High-Performance Concrete. International Federation for Structural Concrete (fib), Tokyo, 27-29 Outubro, 2008.

NADEAU, J. C. **A multiscale model for effective moduli of concrete incorporating ITZ, water-cement ration gradients, aggregate size distributions, and etrapped voids**. Cement and Concrete Research, Vol. 33, p. 103 - 113, 2003.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2ª ed. São Paulo/SP: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2ª ed. Porto Alegre/RS: Bookman, 2013.

NILSEN, A. U.; MONTEIRO, P. J. M.; GJØRV, O. E. **Estimation of the elastic moduli of lightweight aggregate**. Cement and Concrete Research, Vol. 25, p. 276 – 280, 1995.

NUNES, F. W. D. G. **Avaliação da resistência e do módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). 110 fls. Rio de Janeiro/RJ, 2005.

OLIVEIRA, T. S.; CARDOSO, A. C. S. **Deformação lenta das estruturas de concreto armado e suas manifestações patológicas**. Revista de Engenharia e Tecnologia, Vol. 10, n. 2, 2018.

ÖZBAY, E.; ERDEMIR, M.; DURMUS, H. I. **Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review**. Construction and Building Materials, Vol. 105, p. 423-434, 2016.

PACHECO, R. F. R. **Análise do módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em centrais na grande Vitória. Experimentos e Estatística**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. 332 fls. Vitória/ES, 2006.

PAULON, V. A.; MONTEIRO, P. J. M. **Estudos da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado**. Boletim Técnico nº 43 – EPUSP, São Paulo/SP, 1991.

PEREIRA NETO, P. M. P.; DJANIKIAN, J. G. **Algumas características do módulo de elasticidade de concretos de alta resistência**. Anais do 37º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Goiânia/GO, 1995.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. Porto Alegre/RS: Globo, 1979.

POMPEO NETO, B. B.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. **Efeito do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência**. Revista Matéria, Vol.16, n. 2, 2011.

POWERS, T. C. **Bulletin 196: The nature of concrete. Research and Development Laboratories of the Portland Cement Association.** Illinois: American Society for Testing and Materials (ASTM), 1966.

PRADO, L. D. A. **Módulo de deformação estático do concreto de baixa e alta relação a/c pelo método ultra – sônico.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. 226 fls. Goiás/GO, 2006.

RAMESH, G.; SOTELINO, E. D.; CHEIN, W. F. **Effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials.** Cement and Concrete Research, Vol. 26, p. 611 – 622, 1996.

RECENA, F. A. P. **Método de dosagem de concreto pelo volume de pasta com emprego do cinza volante.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 263 fls. Porto Alegre/RS, 2011.

RECENA, F. A. P. **Dosagem Empírica e Controle da Qualidade de Concretos Convencionais de Cimento Portland.** Porto Alegre/RS: EDIPUCRS, 2017.

RIBEIRO, A. B.; ALMEIDA, I. R. **Módulo de elasticidade em compressão de concreto compactado a rolo.** Anais do 44º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Belo Horizonte/MG, 2002.

RODRIGUES, G. S. S. **Módulo de deformação estático do concreto pelo método ultra- sônico: estudo da correlação e fatores influentes.** Dissertação de Mestrado (Curso de Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás. Goiânia/GO, 2003.

RODRIGUES, G. S. S.; FIGUEIREDO, E.J.P. **Estudo dos fatores influentes sobre os resultados de módulo de deformação estático do concreto.** Anais do 46º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Florianópolis/SC, 2004.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto (ET-67).** Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). São Paulo/SP, 3ª edição, 35 fls, 1998.

ROHDEN, A. B. **Efeito da resistência e da dimensão máxima característica do agregado graúdo nas propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. 134 fls. Porto Alegre/RS, 2011.

ROSSIGNOLO, J. A. **Módulo de deformação do concreto leve estrutural de alto desempenho.** Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia, 2005.

SALMAN, M. M.; AL-AMAWEE, A. **The ratio between static and dynamic modulus of elasticity in normal and high strength concrete.** Journal of Engineering and Development, Vol. 10, p. 163 – 174, 2006.

SANTOS, A. C. *et al.* **Estudo comparativo entre valores teóricos e resultados experimentais de módulo de elasticidade de concretos produzidos com diferentes tipos de agregado graúdo.** Ambiente Construído. Vol. 17, n.3, p. 281 – 294, 2017.

- SBRIGHI NETO, C. **Agregados para Concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações. 1ª ed. São Paulo/SP, 2005.
- SCHANKOSKI, R. A. *et al.* **Avaliação da reologia de concretos autoadensáveis contendo fílers de britagem**. Revista Matéria, v.22, n.2, 2017.
- SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. **Hydration of cementitious materials, present and future**. Cement and Concrete Research, Vol. 41, p. 651 – 665, 2011.
- SCRIVENER, K. L.; JUILLAND, P.; MONTEIRO, P. J. M. **Advances in understanding hydration of Portland cement**. Cement and Concrete Research, Vol. 78, p. 38 – 56, 2015.
- SHEHATA, L. D. **Deformações instantâneas do concreto**. In: Isaia, G. C. (Ed). Concreto: Ensino, pesquisa e realizações. 1ª ed. São Paulo/SP, 2005.
- SIDERIS, K. K.; MANITA, P.; SIDERIS, K. **Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ration of normal concrete**. Cement & Concrete Composites, Vol. 26, p. 623 – 631, 2004.
- SILVA, K. J. D. **Estudo do comportamento do módulo de deformação de concretos com um ano de idade, produzidos com diferentes agregado graúdos**. Monografia de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológico de Goiás. Goiânia/GO, 2003.
- SILVA, M. A. F., FILHO, J. R. F. **Verificação do estado limite de deformações excessivas em vigas de concreto armado de acordo com as recomendações da NBR 6118:2003**. Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Rio de Janeiro/RJ, 2006.
- SILVA, A. S. R. *et al.* **Estudo para avaliação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade pelo método mecânico e do ultrassom de concretos produzidos em Salvador-BA**. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Salvador/BA, 2008.
- SILVA, K. A. N. D. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas. 113 fls. Maceió/AL, 2011.
- SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. **Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete**. Journal of Cleaner Production, Vol. 112, p. 2171-2186, 2016.
- TANG, W. C., RYAN, P. C., CUI, H. Z.; LIAO, W. **Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Coarse Aggregate**. Advances in Materials Science and Engineering, Vol. 2016, 2016.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Thomas Telford, 2nd edition, 1997.
- TIBBETTS, C. M. *et al.* **Aggregate correction factors for concrete elastic modulus prediction**. ACI Structural Journal, p. 931-940, 2018.
- TOMOSAWA, F.; NOGUCHI, T.; **Relationship between Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete**. Proceedings of the Third International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, Vol. 2, Lillehammer, Norway, p. 1247-1254, 1993.

- TOPÇU, I. B.; UGURLU, A. **Elasticity theory of concrete and prediction of static E - modulus for dam concrete using composite models**. Digest, p. 1115-1127, 2007.
- TORALLES-CARBONARI, B. M. *et al.* **Concretos de Alto Desempenho auto-adensável com adição de fibra de aço: tenacidade e módulo de elasticidade**. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Salvador/BA, 2008.
- TORRENTI, J. M.; BOULAY, C.; PUCH, C. **The Young`s modulus of concrete reconsidered**. Cement and Concrete Research, Vol. 24, p. 641-649, 1994.
- VASCONCELOS, A. C.; GIAMMUSSO, S. E. **O misterioso módulo de elasticidade**. Anais do 40º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Rio de Janeiro/RJ, 1998.
- VIANA NETO, L. A. C; SALES, A. T. C.; SALES, L. C. **Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland**. Revista Matéria, Vol. 23, n.1, 2018.
- VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 189 fls. Porto Alegre/RS, 2008.
- VIEIRA, T. M. *et al.* **Influência da dimensão do corpo de prova de concreto e da forma de capeamento nos resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade**. Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Salvador/BA, 2008.
- VILARDELL, J.; AGUADO, A.; AGULLO, L.; GETTU, R. **Estimation of the modulus of elasticity for dam concrete**. Cement and Concrete Research, Vol. 28, p. 93-101, 1998.
- VOGEL, H. M.; SVECOVA, D. **Evaluation of Elastic Modulus for High-Strength Concrete**. ACI Materials Journal, May-June, p. 313 – 322, 2012.
- VOGT, J. C. **Estudo da influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 98 fls. Belo Horizonte/MG, 2006.
- WANG, H.; LI, Q. **Prediction of elastic modulus and Poisson`s ratio for unsaturated concrete**. International Journal of Solids and Structures, Vol. 44, p. 1370-1379, 2007.
- WU, K.-R. *et al.* **Rupture probability of coarse aggregate on fracture surface of concrete**. Cement and Concrete Research, Vol. 29, p.1983 – 1987, 1999.
- WU, K.-R. *et al.* **Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete**. Cement and Concrete Research, Vol. 31, p.1421 - 1425, 2001.
- XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading**. Cement and Concrete Research, Vol. 35, p. 1187-1194, 2005.

- XIE, Y. *et al.* **Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC).** Cement and Concrete Composites, Vol. 55, p. 223-231, 2015.
- XUAN, D.; ZHAN, B.; POON, C. S. **Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates.** Cement and Concrete Composites, Vol. 65, p. 67 - 74, 2016.
- YANG, C. C.; HUANG, R.; YEIH, W.; SUE, I. C. **Aggregate effect on elastic moduli of cement – based composite materials.** Journal of Marine Science and Technology, Vol. 3, p. 5-10, 1995.
- YANG, C. C.; HUANG, R. **Double inclusion model for approximate elastic moduli of concrete material.** Cement and Concrete Research, Vol. 26, p. 83-91, 1996.
- YILDIRIM, H.; OZKAN, S. **Modulus of elasticity of substandard and normal concretes.** Construction and Building Materials, Vol. 25, p. 1645-1652, 2011.
- ZHOU, F. P.; LYDON, F. D.; BARR, B. I. G. **Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 25, p. 177-186, 1995.
- ZHOU, Y.; *et al.* **A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete.** Construction and Building Materials, Vol. 98, p. 137-145, 2015.
- ZIJIAN, J. *et al.* **Quantitative Characterization and Elastic Properties of Interfacial Transition Zone around Coarse Aggregate in Concrete.** Journal of Wuhan University of Technology. Vol. 32, p. 838-844, 2017.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: VOLUME DE PASTA

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|------------------|--------------|--|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 | 28 | 52,8 | 34,2 | 31,2 | 29,4 | 27,8 | 26,1 | 23,3 | 21,7 | 53,0 | 1,00 |
| | | | 31,2 | 29,9 | 28,7 | 27,3 | 26,4 | 24,9 | 22,8 | 52,6 | 1,00 |
| | | | 30,5 | 29,3 | 28,5 | 27,5 | 26,1 | 24,8 | 22,5 | 53,7 | 1,02 |
| E_{cs} (médio) | | 32,0 | 30,1 | 28,9 | 27,5 | 26,2 | 24,3 | 22,3 | - | - | |
| 1:3,75 | | 54,8 | 32,1 | 32,2 | 30,1 | 28,9 | 28,6 | 27,9 | 25,7 | 52,4 | 0,96 |
| | | | 33,1 | 31,8 | 29,3 | 29,1 | 27,8 | 26,0 | 24,7 | 55,3 | 1,01 |
| | | | 33,1 | 31,3 | 30,1 | 27,9 | 28,4 | 26,7 | 24,8 | 53,0 | 0,97 |
| E_{cs} (médio) | | 32,8 | 31,8 | 29,8 | 28,6 | 28,3 | 26,9 | 25,1 | - | - | |
| 1:4,50 | | 54,6 | 35,7 | 32,9 | 32,0 | 31,5 | 29,0 | 28,5 | 26,8 | 55,6 | 1,02 |
| | | | 35,3 | 31,8 | 31,5 | 30,6 | 29,3 | 27,9 | 25,5 | 55,2 | 1,01 |
| | | | 32,5 | 31,7 | 30,6 | 29,6 | 28,6 | 27,1 | 25,5 | 52,7 | 0,97 |
| E_{cs} (médio) | | 34,5 | 32,1 | 31,6 | 30,6 | 29,0 | 27,8 | 25,9 | - | - | |
| 1:5,00 | 56,6 | 33,0 | 31,5 | 29,4 | 28,4 | 28,0 | 26,3 | 23,8 | 53,4 | 0,94 | |
| | | 35,7 | 33,9 | 32,0 | 30,6 | 29,5 | 27,3 | 23,2 | 56,2 | 0,99 | |
| | | 34,3 | 32,1 | 29,3 | 28,2 | 27,0 | 26,0 | 23,4 | 55,6 | 0,98 | |
| E_{cs} (médio) | 34,3 | 32,5 | 30,2 | 29,1 | 28,2 | 26,5 | 23,5 | - | - | | |
| 1:6,00 | 38,4 | 35,4 | 34,1 | 32,2 | 30,5 | 29,0 | 26,9 | 24,3 | 40,7 | 1,06 | |
| | | 34,5 | 33,6 | 29,4 | 28,5 | 26,1 | 22,8 | 18,3 | 36,3 | 0,95 | |
| | | 32,8 | 32,1 | 30,7 | 26,9 | 26,3 | 23,0 | 20,2 | 36,3 | 0,95 | |
| E_{cs} (médio) | 34,2 | 33,3 | 30,8 | 28,6 | 27,1 | 24,2 | 20,9 | - | - | | |

APÊNDICE B – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|--------------|--|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:4,50 (referência) | 28 | 54,6 | 35,7 | 32,9 | 32,0 | 31,5 | 29,0 | 28,5 | 26,8 | 55,6 | 1,02 |
| | | | 35,3 | 31,8 | 31,5 | 30,6 | 29,3 | 27,9 | 25,5 | 55,2 | 1,01 |
| | | | 32,5 | 31,7 | 30,6 | 29,6 | 28,6 | 27,1 | 25,5 | 52,7 | 0,97 |
| E_{cs} (médio) | | 34,5 | 32,1 | 31,6 | 30,6 | 29,0 | 27,8 | 25,9 | - | - | |
| 1:4,50 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 46,5 | 24,6 | 24,5 | 24,4 | 24,0 | 23,7 | 22,6 | 20,7 | 46,9 | 1,01 |
| | | | 33,1 | 30,5 | 29,1 | 27,6 | 25,3 | 23,2 | 20,6 | 44,9 | 0,97 |
| | | | 32,3 | 31,4 | 30,3 | 29,8 | 27,6 | 25,0 | 21,2 | 45,0 | 0,97 |
| E_{cs} (médio) | | 30,0 | 28,8 | 27,9 | 27,1 | 25,5 | 23,6 | 20,8 | - | - | |
| 1:4,50 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 35,1 | 26,5 | 24,3 | 23,2 | 22,8 | 22,2 | 21,3 | 19,3 | 35,7 | 1,02 |
| | | | 30,3 | 28,1 | 26,9 | 25,4 | 23,4 | 21,4 | 18,6 | 32,2 | 0,92 |
| | | | 31,5 | 30,3 | 29,5 | 26,6 | 25,0 | 23,7 | 21,7 | 33,8 | 0,96 |
| E_{cs} (médio) | | 29,4 | 27,6 | 26,2 | 24,9 | 23,5 | 22,1 | 19,9 | - | - | |

APÊNDICE C – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: TEOR DE ARGAMASSA

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:4,50 com 48% de argamassa | 28 | 54,7 | 34,8 | 32,5 | 31,3 | 29,8 | 27,5 | 26,3 | 23,0 | 53,8 | 0,98 |
| | | | 30,9 | 29,7 | 29,0 | 27,6 | 26,0 | 23,7 | 22,5 | 43,7 | 0,80 |
| | | | 37,8 | 35,1 | 32,6 | 30,2 | 27,7 | 25,3 | 22,7 | 56,0 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,5 | 32,4 | 31,0 | 29,2 | 27,1 | 25,1 | 22,7 | - | - |
| 1:4,50 com 54% de argamassa | | 54,6 | 35,7 | 32,9 | 32,0 | 31,5 | 29,0 | 28,5 | 26,8 | 55,6 | 1,02 |
| | | | 35,3 | 31,8 | 31,5 | 30,6 | 29,3 | 27,9 | 25,5 | 55,2 | 1,01 |
| | | | 32,5 | 31,7 | 30,6 | 29,6 | 28,6 | 27,1 | 25,5 | 52,7 | 0,97 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,5 | 32,1 | 31,6 | 30,6 | 29,0 | 27,8 | 25,9 | - | - |
| 1:4,50 com 60% de argamassa | | 51,6 | 33,4 | 31,3 | 30,0 | 28,9 | 27,8 | 26,0 | 25,2 | 56,4 | 1,09 |
| | | | 35,0 | 32,1 | 30,6 | 29,4 | 28,2 | 26,8 | 25,6 | 50,9 | 0,99 |
| | | | 33,7 | 31,2 | 29,2 | 27,8 | 27,2 | 26,2 | 25,5 | 54,2 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,0 | 31,5 | 29,9 | 28,7 | 27,7 | 26,3 | 25,4 | - | - |

APÊNDICE D – RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE: TIPO DO AGREGADO GRAÚDO

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|--|--------------|--|----------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:4,50 com Granito volume absoluto constante | 28 | 41,7 | 26,7 | 25,2 | 24,3 | 23,9 | 23,2 | 21,8 | 20,7 | 45,0 | 1,08 |
| | | | 24,6 | 24,4 | 23,7 | 22,4 | 22,3 | 21,2 | 19,7 | 43,0 | 1,03 |
| | | | 26,3 | 25,4 | 24,5 | 23,7 | 22,7 | 21,7 | 20,2 | 42,3 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 25,9 | 25,0 | 24,2 | 23,3 | 22,7 | 21,6 | 20,2 | - | - |
| 1:4,50 com Basalto volume absoluto constante | | 41,3 | 34,2 | 32,9 | 29,6 | 29,3 | 27,4 | 27,3 | 26,0 | 48,1 | 1,16 |
| | | | 36,5 | 33,6 | 33,2 | 31,5 | 29,3 | 28,5 | 26,6 | 47,1 | 1,14 |
| | | | 36,4 | 34,4 | 31,4 | 29,8 | 29,1 | 27,9 | 26,8 | 46,9 | 1,14 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,7 | 33,6 | 31,4 | 30,2 | 28,6 | 27,9 | 26,5 | - | - |
| 1:4,50 com Diabásio volume absoluto constante | | 42,6 | 40,1 | 38,3 | 38,0 | 37,9 | 35,1 | 31,5 | 28,3 | 45,6 | 1,07 |
| | | | 41,3 | 39,4 | 35,2 | 32,7 | 31,0 | 28,6 | 26,0 | 45,2 | 1,06 |
| | | | 43,2 | 41,1 | 38,3 | 36,1 | 33,3 | 30,4 | 26,9 | 43,1 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,5 | 39,6 | 37,2 | 35,6 | 33,1 | 30,2 | 27,1 | - | - |

APÊNDICE E – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: VOLUME DE PASTA

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:2,00 | 14 | 49,2 | 30,0 | 29,2 | 28,3 | 27,4 | 26,1 | 24,7 | 22,7 | 49,3 | 1,00 |
| | | | 32,1 | 30,2 | 28,5 | 27,2 | 25,5 | 23,7 | 20,6 | 47,5 | 0,97 |
| | | | 35,4 | 33,1 | 30,7 | 29,3 | 27,3 | 25,9 | 23,7 | 48,5 | 0,99 |
| E_{cs} (médio) | | 32,5 | 30,8 | 29,2 | 28,0 | 26,3 | 24,8 | 22,3 | - | | |
| 1:3,00 | | 50,5 | 36,4 | 35,1 | 34,1 | 33,1 | 31,8 | 30,0 | 26,7 | 50,3 | 1,00 |
| | | | 31,5 | 30,6 | 30,8 | 30,3 | 30,0 | 27,9 | 25,5 | 49,2 | 0,97 |
| | | | 37,0 | 35,3 | 33,9 | 32,1 | 30,5 | 29,1 | 27,3 | 52,0 | 1,03 |
| E_{cs} (médio) | | 35,0 | 33,7 | 32,9 | 31,8 | 30,8 | 29,0 | 26,5 | - | | |
| 1:4,00 | | 48,5 | 40,9 | 38,3 | 36,3 | 34,4 | 32,5 | 30,1 | 26,5 | 48,0 | 0,99 |
| | | | 36 | 34,2 | 33,0 | 31,5 | 29,8 | 29,5 | 29 | 48,3 | 1,00 |
| | | | 36,4 | 34,6 | 33,3 | 32,2 | 30,6 | 28,6 | 25,1 | 48,7 | 1,00 |
| E_{cs} (médio) | | 37,8 | 35,7 | 34,2 | 32,7 | 31,0 | 29,4 | 26,9 | - | | |
| 1:5,00 | 49,4 | 40,6 | 39,4 | 36,4 | 34,0 | 31,8 | 29,2 | 28,6 | 52,9 | 1,07 | |
| | | 40,4 | 38,4 | 37,5 | 36,6 | 34,4 | 31,9 | 27,8 | 51,5 | 1,04 | |
| | | 42,8 | 38,3 | 35,7 | 32,5 | 31,0 | 28,6 | 26,2 | 50,5 | 1,02 | |
| E_{cs} (médio) | 41,3 | 38,7 | 36,5 | 34,4 | 32,4 | 29,9 | 27,5 | - | | | |
| 1:6,00 | 50,6 | 42,8 | 38,5 | 37,4 | 36,0 | 34,3 | 32,4 | 29,3 | 52,8 | 1,04 | |
| | | 40,8 | 40,8 | 37,5 | 36,0 | 34,5 | 31,6 | 29,3 | 53,3 | 1,05 | |
| | | 42,8 | 38,3 | 37,9 | 36,0 | 33,2 | 32,9 | 30,0 | 50,4 | 1,00 | |
| E_{cs} (médio) | 42,1 | 39,2 | 37,6 | 36,0 | 34,0 | 32,3 | 29,5 | - | | | |
| 1:7,00 | 47,3 | 40,8 | 40,4 | 38,4 | 36,6 | 34,1 | 32,5 | 30,6 | 49,4 | 1,04 | |
| | | 43,1 | 40,4 | 38,0 | 36,5 | 34,0 | 32,7 | 30,7 | 47,0 | 0,99 | |
| | | 40,6 | 39,7 | 38,8 | 36,9 | 35,0 | 31,9 | 29,1 | 44,1 | 0,93 | |
| E_{cs} (médio) | 41,5 | 40,2 | 38,4 | 36,7 | 34,4 | 32,4 | 30,1 | - | | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|------------|------------------|--|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:2,00 | 28 | 56,3 | 32,6 | 31,6 | 30,7 | 29,7 | 28,7 | 27,3 | 25,6 | 54,9 | 0,98 |
| | | | 30,8 | 30,5 | 30,2 | 29,6 | 28,8 | 27,8 | 26,4 | 55,8 | 0,99 |
| | | | 33,3 | 32,6 | 31,6 | 30,5 | 29,6 | 28,4 | 26,9 | 58,3 | 1,04 |
| | | E_{cs} (médio) | 32,2 | 31,6 | 30,8 | 29,9 | 29,0 | 27,8 | 26,3 | - | |
| 1:3,00 | | 58,0 | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 38,4 | 36,3 | 34,9 | 33,2 | 31,5 | 28,6 | 26,5 | 54,4 | 0,94 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,2 | 36,0 | 34,8 | 33,5 | 32,0 | 29,4 | 27,4 | - | |
| 1:4,00 | | 55,3 | 37,6 | 36,4 | 35,4 | 34,1 | 32,6 | 30,2 | 27,9 | 55,7 | 1,01 |
| | | | 40,1 | 38,0 | 36,6 | 34,8 | 33,2 | 31,2 | 28,2 | 56,3 | 1,02 |
| | | | 38,2 | 36,9 | 35,3 | 33,9 | 32,4 | 30,6 | 28,5 | 55,9 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 38,6 | 37,1 | 35,8 | 34,3 | 32,7 | 30,7 | 28,2 | - | |
| 1:5,00 | 56,7 | 40,7 | 39,8 | 38,4 | 37,3 | 35,9 | 34,5 | 32,1 | 57,2 | 1,01 | |
| | | 39,3 | 38,7 | 37,4 | 36,3 | 34,9 | 33,3 | 31,0 | 55,5 | 0,98 | |
| | | 39,6 | 38,9 | 37,1 | 35,9 | 34,5 | 32,6 | 29,9 | 59,3 | 1,05 | |
| | E_{cs} (médio) | 39,9 | 39,1 | 37,6 | 36,5 | 35,1 | 33,5 | 31,0 | - | | |
| 1:6,00 | 58,8 | 41,3 | 40,6 | 39,6 | 38,5 | 36,2 | 34,6 | 32,4 | 60,4 | 1,03 | |
| | | 42,5 | 40,8 | 39,3 | 38,2 | 36,3 | 34,4 | 31,9 | 58,5 | 0,99 | |
| | | 43,6 | 41,6 | 40,4 | 36,6 | 34,0 | 31,4 | 29,4 | 59,4 | 1,01 | |
| | E_{cs} (médio) | 42,5 | 41,0 | 39,8 | 37,8 | 35,5 | 33,5 | 31,2 | - | | |
| 1:7,00 | 52,8 | 45,1 | 42,9 | 40,5 | 38,3 | 36,7 | 35,4 | 33,5 | 51,0 | 0,97 | |
| | | 44,7 | 42,2 | 40,4 | 38,7 | 36,4 | 34,7 | 32,6 | 53,5 | 1,01 | |
| | | 43,8 | 41,4 | 38,9 | 38,0 | 37,4 | 35,2 | 33,3 | 50,9 | 0,96 | |
| | E_{cs} (médio) | 44,5 | 42,2 | 39,9 | 38,3 | 36,8 | 35,1 | 33,1 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|------------------|--------------|--|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:2,00 | 150 | 69,4 | 33,7 | 32,7 | 31,3 | 30,2 | 28,0 | 27,4 | 24,5 | 69,4 | 1,00 |
| | | | 34,3 | 33,3 | 31,6 | 32,0 | 29,6 | 29,0 | 26,2 | 68,3 | 0,98 |
| | | | 35,2 | 34,0 | 32,0 | 31,2 | 29,5 | 29,1 | 26,4 | 63,7 | 0,92 |
| E_{cs} (médio) | | 34,4 | 33,3 | 31,6 | 31,1 | 29,0 | 28,5 | 25,7 | - | - | |
| 1:3,00 | | 68,6 | 36,1 | 35,2 | 35,0 | 34,9 | 33,9 | 32,7 | 32,5 | 69,6 | 1,01 |
| | | | 37,6 | 37,0 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 65,3 | 0,95 |
| | | | 37,4 | 36,5 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 70,8 | 1,03 |
| E_{cs} (médio) | | 37,0 | 36,2 | 35,6 | 34,9 | 33,6 | 32,4 | 31,8 | - | - | |
| 1:4,00 | | 66,2 | 40,6 | 39,3 | 38,1 | 37,2 | 36,1 | 34,7 | 33,2 | 67,4 | 1,02 |
| | | | 42,4 | 41,4 | 39,7 | 38,6 | 38,2 | 36,1 | 35,6 | 70,4 | 1,06 |
| | | | 35,1 | 33,7 | 33,1 | 33,0 | 32,7 | 32,4 | 31,6 | 71,1 | 1,07 |
| E_{cs} (médio) | | 39,4 | 38,1 | 37,0 | 36,3 | 35,7 | 34,4 | 33,5 | - | - | |
| 1:5,00 | 69,1 | 40,9 | 39,9 | 39,5 | 38,0 | 37,9 | 35,3 | 33,7 | 71,8 | 1,04 | |
| | | 40,5 | 40,3 | 38,9 | 38,8 | 36,5 | 35,5 | 33,2 | 69,0 | 1,00 | |
| | | 43,5 | 42,3 | 41,5 | 39,3 | 39,3 | 36,0 | 34,1 | 70,2 | 1,02 | |
| E_{cs} (médio) | 41,6 | 40,8 | 40,0 | 38,7 | 37,9 | 35,6 | 33,7 | - | - | | |
| 1:6,00 | 68,9 | 40,9 | 40,7 | 38,6 | 39,1 | 36,7 | 36,4 | 33,7 | 67,5 | 0,98 | |
| | | 42,4 | 40,3 | 41,0 | 38,3 | 38,2 | 35,4 | 34,6 | 69,5 | 1,01 | |
| | | 42,2 | 42,8 | 41,1 | 40,3 | 38,9 | 37,0 | 34,9 | 70,8 | 1,03 | |
| E_{cs} (médio) | 41,8 | 41,3 | 40,2 | 39,2 | 37,9 | 36,3 | 34,4 | - | - | | |
| 1:7,00 | 63,9 | 45,9 | 43,4 | 41,9 | 40,2 | 38,8 | 37,0 | 35,5 | 64,9 | 1,02 | |
| | | 40,8 | 40,3 | 39,5 | 38,9 | 37,3 | 35,7 | 34,1 | 60,9 | 0,95 | |
| | | 45,9 | 45,1 | 43,3 | 41,0 | 39,3 | 37,8 | 36,6 | 61,6 | 0,96 | |
| E_{cs} (médio) | 44,2 | 42,9 | 41,6 | 40,0 | 38,5 | 36,8 | 35,4 | - | - | | |

APÊNDICE F – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef} / f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|--------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (referência) | 14 | 50,5 | 36,4 | 35,1 | 34,1 | 33,1 | 31,8 | 30,0 | 26,7 | 50,3 | 1,00 |
| | | | 31,5 | 30,6 | 30,5 | 30,3 | 30,0 | 27,9 | 25,5 | 49,2 | 0,97 |
| | | | 37,0 | 35,3 | 33,9 | 32,1 | 30,5 | 29,1 | 27,3 | 52,0 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,0 | 33,7 | 32,8 | 31,8 | 30,8 | 29,0 | 26,5 | - | |
| 1:3,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 41,1 | 35,8 | 33,4 | 32,8 | 31,6 | 30,1 | 28,2 | 26,1 | 40,1 | 0,98 |
| | | | 36,3 | 32,5 | 33,1 | 31,6 | 30,0 | 27,8 | 25,1 | 41,0 | 1,00 |
| | | | 34,2 | 32,6 | 30,7 | 29,4 | 27,7 | 24,9 | 22,5 | 40,0 | 0,97 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,4 | 32,8 | 32,2 | 30,9 | 29,3 | 27,0 | 24,6 | - | |
| 1:3,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 30,4 | 34,0 | 32,4 | 31,2 | 29,8 | 28,3 | 26,4 | 24,3 | 32,9 | 1,08 |
| | | | 35,3 | 33,4 | 31,7 | 30,0 | 28,4 | 26,5 | 24,3 | 33,8 | 1,11 |
| | | | 32,2 | 31,1 | 29,7 | 28,5 | 27,0 | 25,4 | 23,3 | 29,1 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 33,8 | 32,3 | 30,9 | 29,4 | 27,9 | 26,1 | 24,0 | - | |
| 1:3,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | | 21,0 | 30,9 | 29,2 | 27,4 | 25,7 | 23,7 | 21,6 | 18,9 | 21,2 | 1,01 |
| | | | 31,6 | 29,6 | 28,1 | 26,2 | 24,4 | 22,0 | 19,8 | 21,5 | 1,02 |
| | 30,1 | | 28,5 | 27,2 | 25,5 | 23,5 | 21,8 | 19,3 | 21,7 | 1,03 | |
| | E_{cs} (médio) | 30,9 | 29,1 | 27,6 | 25,8 | 23,9 | 21,8 | 19,3 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef} / f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|--------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (referência) | 28 | 58,0 | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 38,4 | 36,3 | 34,9 | 33,2 | 31,5 | 28,6 | 26,5 | 54,4 | 0,94 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,2 | 36,0 | 34,8 | 33,5 | 32,0 | 29,4 | 27,4 | - | |
| 1:3,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 46,7 | 36,6 | 35,2 | 34,1 | 33,0 | 31,6 | 29,9 | 27,7 | 48,7 | 1,04 |
| | | | 35,2 | 34,1 | 33,1 | 31,7 | 30,7 | 29,0 | 27,0 | 45,7 | 0,98 |
| | | | 36,4 | 34,8 | 33,5 | 32,2 | 30,7 | 28,9 | 27,0 | 45,9 | 0,98 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,1 | 34,7 | 33,6 | 32,3 | 31,0 | 29,3 | 27,2 | - | |
| 1:3,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 37,1 | 33,4 | 33,0 | 31,7 | 30,3 | 28,6 | 26,4 | 23,6 | 36,8 | 0,99 |
| | | | 35,7 | 34,1 | 32,4 | 30,9 | 29,0 | 27,3 | 25,0 | 37,2 | 1,00 |
| | | | 35,5 | 33,9 | 32,7 | 31,2 | 29,8 | 28,0 | 25,8 | 38,7 | 1,04 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,9 | 33,7 | 32,3 | 30,8 | 29,1 | 27,2 | 24,8 | - | |
| 1:3,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | | 26,8 | 32,8 | 31,5 | 30,1 | 28,4 | 26,6 | 24,3 | 21,8 | 23,7 | 0,88 |
| | | | 31,4 | 29,9 | 28,2 | 26,7 | 25,1 | 23,1 | 20,6 | 26,1 | 0,97 |
| | 32,2 | | 30,6 | 29,0 | 27,7 | 25,7 | 23,3 | 20,8 | 25,7 | 0,96 | |
| | E_{cs} (médio) | 32,1 | 30,7 | 29,1 | 27,6 | 25,8 | 23,6 | 21,1 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (referência) | 150 | 68,6 | 36,1 | 35,2 | 35,0 | 34,9 | 33,9 | 32,7 | 32,5 | 69,6 | 1,01 |
| | | | 37,6 | 37,0 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 65,3 | 0,95 |
| | | | 37,4 | 36,5 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 70,8 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,0 | 36,2 | 35,6 | 34,9 | 33,6 | 32,4 | 31,8 | - | - |
| 1:3,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 58,5 | 37,1 | 36,2 | 36,0 | 35,4 | 34,5 | 33,3 | 32,1 | 58,8 | 1,01 |
| | | | 36,9 | 35,3 | 34,5 | 32,6 | 32,5 | 31,0 | 30,5 | 56,1 | 0,96 |
| | | | 35,8 | 35,6 | 35,5 | 34,8 | 33,0 | 32,2 | 32,0 | 59,5 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,6 | 35,7 | 35,3 | 34,3 | 33,3 | 32,2 | 31,5 | - | - |
| 1:3,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 49,8 | 38,7 | 36,6 | 36,4 | 35,4 | 34,3 | 32,8 | 30,5 | 54,6 | 1,10 |
| | | | 35,2 | 34,3 | 34,1 | 33,4 | 32,3 | 32,2 | 30,0 | 55,2 | 1,11 |
| | | | 33,9 | 33,0 | 32,8 | 32,5 | 31,7 | 31,0 | 29,3 | 51,1 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,9 | 34,6 | 34,4 | 33,8 | 32,8 | 32,0 | 29,9 | - | - |
| 1:3,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 36,7 | 32,4 | 31,8 | 30,6 | 29,6 | 28,4 | 27,0 | 25,0 | 37,1 | 1,01 | |
| | | 32,6 | 32,0 | 31,2 | 30,6 | 29,9 | 28,0 | 26,2 | 37,7 | 1,03 | |
| | | 31,3 | 30,8 | 29,7 | 29,5 | 28,0 | 25,4 | 24,2 | 33,5 | 0,91 | |
| | E_{cs} (médio) | 32,1 | 31,5 | 30,5 | 29,9 | 28,8 | 26,8 | 25,1 | - | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:5,00 (referência) | 14 | 49,4 | 40,6 | 39,4 | 36,4 | 34,0 | 31,8 | 29,2 | 28,6 | 52,9 | 1,07 |
| | | | 40,4 | 38,4 | 37,5 | 36,6 | 34,4 | 31,9 | 27,8 | 51,5 | 1,04 |
| | | | 42,8 | 38,3 | 35,7 | 32,5 | 31,0 | 28,6 | 26,2 | 50,5 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,3 | 38,7 | 36,5 | 34,4 | 32,4 | 29,9 | 27,5 | - | - |
| 1:5,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 34,8 | 35,5 | 34,3 | 33,2 | 32,1 | 30,8 | 29,3 | 26,3 | 39,4 | 1,13 |
| | | | 34,3 | 33,1 | 31,9 | 30,7 | 29,4 | 27,6 | 24,9 | 32,4 | 0,93 |
| | | | 34,1 | 32,2 | 30,4 | 28,4 | 26,2 | 23,0 | 21,4 | 36,4 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,6 | 33,2 | 31,8 | 30,4 | 28,8 | 26,6 | 24,2 | - | - |
| 1:5,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 29,1 | 33,0 | 30,9 | 29,5 | 27,7 | 26,0 | 24,0 | 21,6 | 28,8 | 0,99 |
| | | | 33,5 | 31,5 | 29,9 | 28,2 | 26,5 | 24,6 | 22,3 | 27,2 | 0,93 |
| | | | 33,3 | 31,3 | 29,8 | 28,1 | 26,1 | 23,8 | 21,4 | 29,4 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 33,3 | 31,2 | 29,7 | 28,0 | 26,2 | 24,1 | 21,8 | - | - |
| 1:5,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 19,5 | 30,2 | 28,5 | 27,0 | 25,6 | 24,0 | 22,0 | 19,9 | 21,0 | 1,08 | |
| | | 31,7 | 29,4 | 27,4 | 25,3 | 23,3 | 21,0 | 18,8 | 18,2 | 0,93 | |
| | | 28,1 | 27,3 | 26,7 | 25,7 | 24,1 | 22,3 | 20,0 | 20,2 | 1,04 | |
| | E_{cs} (médio) | 30,0 | 28,4 | 27,0 | 25,5 | 23,8 | 21,8 | 19,6 | - | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:5,00 (referência) | 28 | 56,7 | 40,7 | 39,8 | 38,4 | 37,3 | 35,9 | 34,5 | 32,1 | 57,2 | 1,01 |
| | | | 39,3 | 38,7 | 37,4 | 36,3 | 34,9 | 33,3 | 31,0 | 55,5 | 0,98 |
| | | | 39,6 | 38,9 | 37,1 | 35,9 | 34,5 | 32,6 | 29,9 | 59,3 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 39,9 | 39,1 | 37,6 | 36,5 | 35,1 | 33,5 | 31,0 | - | |
| 1:5,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 42,1 | 39,0 | 36,5 | 35,1 | 33,5 | 31,6 | 29,7 | 27,2 | 41,5 | 0,99 |
| | | | 35,8 | 34,6 | 33,5 | 32,0 | 30,7 | 28,9 | 26,4 | 40,0 | 0,95 |
| | | | 38,2 | 36,8 | 35,5 | 34,0 | 32,6 | 31,0 | 28,6 | 41,0 | 0,97 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,8 | 36,0 | 34,7 | 33,2 | 31,6 | 29,9 | 27,4 | - | |
| 1:5,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 32,5 | 35,9 | 35,7 | 29,6 | 28,0 | 26,4 | 24,3 | 21,8 | 30,2 | 0,93 |
| | | | 37,6 | 33,7 | 29,6 | 28,3 | 26,9 | 25,0 | 22,8 | 32,4 | 1,00 |
| | | | 37,6 | 35,3 | 29,3 | 27,9 | 26,3 | 23,4 | 21,5 | 32,7 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,0 | 34,9 | 29,5 | 28,1 | 26,5 | 24,2 | 22,0 | - | |
| 1:5,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 22,6 | 32,0 | 30,3 | 29,0 | 27,4 | 25,7 | 23,6 | 21,6 | 21,5 | 0,95 | |
| | | 34,6 | 32,3 | 30,4 | 28,2 | 25,7 | 23,3 | 20,5 | 23,8 | 1,05 | |
| | | 31,5 | 31,3 | 29,6 | 27,5 | 26,6 | 24,6 | 22,6 | 20,4 | 0,90 | |
| | E_{cs} (médio) | 32,7 | 31,3 | 29,7 | 27,7 | 26,0 | 23,8 | 21,6 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:5,00 (referência) | 150 | 69,1 | 40,9 | 39,9 | 39,5 | 38,0 | 37,9 | 35,3 | 33,7 | 71,8 | 1,04 |
| | | | 40,5 | 40,3 | 38,9 | 38,8 | 36,5 | 35,5 | 33,2 | 69,0 | 1,00 |
| | | | 43,5 | 42,3 | 41,5 | 39,3 | 39,3 | 36,0 | 34,1 | 70,2 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,6 | 40,8 | 40,0 | 38,7 | 37,9 | 35,6 | 33,7 | - | |
| 1:5,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 51,4 | 38,8 | 38,6 | 37,7 | 36,7 | 34,7 | 33,5 | 31,6 | 50,1 | 0,97 |
| | | | 38,0 | 37,5 | 36,0 | 35,9 | 33,7 | 32,7 | 30,8 | 48,3 | 0,94 |
| | | | 36,8 | 36,5 | 35,4 | 35,2 | 33,4 | 33,2 | 31,4 | 49,6 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,9 | 37,5 | 36,4 | 35,9 | 33,9 | 33,1 | 31,3 | - | |
| 1:5,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 42,3 | 37,2 | 36,7 | 33,1 | 31,9 | 31,6 | 30,5 | 29,6 | 40,7 | 0,96 |
| | | | 35,1 | 34,2 | 33,8 | 32,5 | 32,4 | 30,9 | 29,6 | 41,7 | 0,99 |
| | | | 37,5 | 35,5 | 33,5 | 32,0 | 32,0 | 30,3 | 29,0 | 43,1 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,6 | 35,5 | 33,5 | 32,1 | 32,0 | 30,6 | 29,4 | - | |
| 1:5,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 31,2 | 33,8 | 31,5 | 28,2 | 27,4 | 26,7 | 25,7 | 22,5 | 33,9 | 1,09 | |
| | | 32,7 | 31,2 | 29,9 | 29,8 | 28,2 | 25,8 | 25,0 | 32,0 | 1,03 | |
| | | 34,5 | 33,8 | 34,7 | 33,9 | 33,4 | 32,8 | 30,7 | 32,8 | 1,05 | |
| | E_{cs} (médio) | 33,7 | 32,2 | 30,9 | 30,4 | 29,4 | 28,1 | 26,1 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 (referência) | 14 | 47,3 | 40,8 | 40,4 | 38,4 | 36,6 | 34,1 | 32,5 | 30,6 | 49,4 | 1,04 |
| | | | 43,1 | 40,4 | 38,0 | 36,5 | 34,0 | 32,7 | 30,7 | 47,0 | 0,99 |
| | | | 40,6 | 39,7 | 38,8 | 36,9 | 35,0 | 31,9 | 29,1 | 44,1 | 0,93 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,5 | 40,2 | 38,4 | 36,7 | 34,4 | 32,4 | 30,1 | - | |
| 1:7,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 32,0 | 36,7 | 34,4 | 32,1 | 30,2 | 27,9 | 25,4 | 22,7 | 33,9 | 1,06 |
| | | | 37,3 | 34,5 | 32,0 | 29,9 | 27,8 | 25,5 | 23,2 | 32,5 | 1,02 |
| | | | 34,5 | 32,4 | 30,1 | 27,9 | 26,0 | 24,1 | 21,8 | 30,6 | 0,95 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,2 | 33,8 | 31,4 | 29,3 | 27,2 | 25,0 | 22,6 | - | |
| 1:7,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 28,5 | 33,9 | 31,3 | 28,9 | 26,8 | 24,4 | 21,9 | 19,2 | 27,7 | 0,97 |
| | | | 36,9 | 34,1 | 31,7 | 29,3 | 26,9 | 24,6 | 21,9 | 29,3 | 1,03 |
| | | | 32,7 | 30,3 | 28,0 | 25,7 | 23,6 | 21,0 | 18,2 | 28,7 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,5 | 31,9 | 29,5 | 27,3 | 25,0 | 22,5 | 19,8 | - | |
| 1:7,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 17,3 | 30,6 | 27,9 | 25,7 | 23,5 | 21,5 | 19,2 | 16,9 | 18,5 | 1,07 | |
| | | 30,1 | 27,6 | 24,9 | 23,0 | 21,0 | 18,8 | 16,3 | 16,8 | 0,97 | |
| | | 30,3 | 27,1 | 25,0 | 22,7 | 20,8 | 18,7 | 16,7 | 19,8 | 1,14 | |
| | E_{cs} (médio) | 30,3 | 27,5 | 25,2 | 23,1 | 21,1 | 18,9 | 16,6 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 (referência) | 28 | 52,8 | 45,1 | 42,9 | 40,5 | 38,3 | 36,7 | 35,4 | 33,5 | 51,0 | 0,97 |
| | | | 44,7 | 42,2 | 40,4 | 38,7 | 36,4 | 34,7 | 32,6 | 53,5 | 1,01 |
| | | | 43,8 | 41,4 | 38,9 | 38,0 | 37,4 | 35,2 | 33,3 | 50,9 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,5 | 42,2 | 39,9 | 38,3 | 36,8 | 35,1 | 33,1 | - | |
| 1:7,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 39,4 | 43,9 | 40,8 | 38,0 | 35,6 | 33,1 | 30,5 | 27,8 | 41,2 | 1,05 |
| | | | 37,4 | 35,7 | 33,7 | 31,9 | 29,6 | 27,4 | 24,7 | 37,6 | 0,95 |
| | | | 40,5 | 38,7 | 36,6 | 34,7 | 32,4 | 30,1 | 27,6 | 39,7 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,6 | 38,4 | 36,1 | 34,1 | 31,7 | 29,3 | 26,7 | - | |
| 1:7,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 30,5 | 38,3 | 35,4 | 33,1 | 31,0 | 28,6 | 26,2 | 23,4 | 32,0 | 1,05 |
| | | | 38,6 | 36,0 | 33,5 | 31,5 | 29,1 | 26,6 | 23,6 | 30,0 | 0,98 |
| | | | 37,8 | 35,1 | 33,0 | 32,8 | 28,4 | 25,8 | 22,8 | 32,3 | 1,06 |
| | | E_{cs} (médio) | 38,2 | 35,5 | 33,2 | 31,8 | 28,7 | 26,2 | 23,3 | - | |
| 1:7,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 20,5 | 35,9 | 31,8 | 29,0 | 26,0 | 23,3 | 20,7 | 17,9 | 20,2 | 0,99 | |
| | | 39,2 | 35,1 | 31,9 | 29,2 | 26,2 | 23,6 | 20,5 | 21,1 | 1,03 | |
| | | 33,1 | 29,7 | 27,0 | 24,1 | 21,6 | 19,0 | 16,7 | 22,3 | 1,09 | |
| | E_{cs} (médio) | 36,1 | 32,2 | 29,3 | 26,4 | 23,7 | 21,1 | 18,4 | - | | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|--|------------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:7,00 (referência) | 150 | 63,9 | 45,9 | 43,4 | 41,9 | 40,2 | 38,8 | 37,0 | 35,5 | 64,9 | 1,02 |
| | | | 40,8 | 40,3 | 39,5 | 38,9 | 37,3 | 35,7 | 34,1 | 60,9 | 0,95 |
| | | | 45,9 | 45,1 | 43,3 | 41,0 | 39,3 | 37,8 | 36,6 | 61,6 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,2 | 42,9 | 41,6 | 40,0 | 38,5 | 36,8 | 35,4 | - | |
| 1:7,00 com 20% de cinza (substituição em volume) | | 50,4 | 43,1 | 40,1 | 38,4 | 35,4 | 34,2 | 32,3 | 29,8 | 47,8 | 0,95 |
| | | | 38,9 | 38,0 | 36,7 | 34,8 | 33,2 | 31,1 | 27,6 | 46,5 | 0,92 |
| | | | 39,4 | 38,8 | 37,8 | 35,3 | 33,5 | 31,6 | 28,4 | 49,6 | 0,98 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,5 | 39,0 | 37,6 | 35,2 | 33,6 | 31,7 | 28,6 | - | |
| 1:7,00 com 40% de cinza (substituição em volume) | | 40,5 | 40,4 | 38,9 | 35,5 | 34,1 | 32,7 | 29,1 | 26,7 | 41,5 | 1,02 |
| | | | 37,7 | 36,9 | 34,8 | 32,3 | 31,0 | 28,7 | 26,9 | 39,5 | 0,98 |
| | | | 42,3 | 36,4 | 35,9 | 34,1 | 33,6 | 30,5 | 27,7 | 40,0 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,1 | 37,4 | 35,4 | 33,5 | 32,4 | 29,4 | 27,1 | - | |
| 1:7,00 com 60% de cinza (substituição em volume) | 28,8 | 39,1 | 35,5 | 33,7 | 31,5 | 29,7 | 27,6 | 25,9 | 27,8 | 0,97 | |
| | | 37,7 | 34,6 | 33,2 | 32,1 | 30,0 | 28,5 | 26,1 | 29,8 | 1,03 | |
| | | 33,1 | 31,6 | 31,0 | 29,1 | 27,3 | 25,4 | 23,7 | 30,1 | 1,05 | |
| | E_{cs} (médio) | 36,6 | 33,9 | 32,6 | 30,9 | 29,0 | 27,2 | 25,2 | - | | |

APÊNDICE G – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: TEOR DE ARGAMASSA

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 com 48% de argamassa | 14 | 48,0 | 36,5 | 34,9 | 33,4 | 32,1 | 30,6 | 30,2 | 28,4 | 48,1 | 1,00 |
| | | | 38,0 | 36,1 | 33,6 | 32,2 | 31,7 | 29,1 | 26,6 | 44,9 | 0,94 |
| | | | 35,7 | 34,3 | 33,4 | 31,9 | 30,9 | 28,6 | 25,7 | 49,4 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,7 | 35,1 | 33,5 | 32,1 | 31,1 | 29,3 | 26,9 | - | |
| 1:3,00 com 54% de argamassa | | 50,5 | 36,4 | 35,1 | 34,1 | 33,1 | 31,8 | 30,0 | 26,7 | 50,3 | 1,00 |
| | | | 31,5 | 30,6 | 30,8 | 30,3 | 30,0 | 27,9 | 25,5 | 49,2 | 0,97 |
| | | | 37,0 | 35,3 | 33,9 | 32,1 | 30,5 | 29,1 | 27,3 | 52,0 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,0 | 33,7 | 32,9 | 31,8 | 30,8 | 29,0 | 26,5 | - | |
| 1:3,00 com 60% de argamassa | | 49,7 | 34,1 | 34,6 | 33,1 | 31,7 | 29,5 | 27,7 | 25,3 | 51,8 | 1,04 |
| | | | 35,8 | 33,6 | 32,9 | 32,9 | 31,2 | 29,5 | 27,4 | 50,3 | 1,01 |
| | | | 36,0 | 32,1 | 31,5 | 31,5 | 29,9 | 28,2 | 26,2 | 53,2 | 1,07 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,3 | 33,4 | 32,5 | 32,0 | 30,2 | 28,5 | 26,3 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 com 48% de argamassa | 28 | 53,9 | 40,0 | 37,1 | 35,1 | 33,2 | 31,1 | 29,9 | 27,4 | 52,4 | 0,97 |
| | | | 36,8 | 35,3 | 34,0 | 32,7 | 30,9 | 29,8 | 29,6 | 53,2 | 0,99 |
| | | | 37,5 | 36,0 | 34,4 | 33,2 | 31,5 | 30,9 | 26,2 | 50,8 | 0,94 |
| | | E_{cs} (médio) | 38,1 | 36,1 | 34,5 | 33,0 | 31,2 | 30,2 | 27,7 | - | |
| 1:3,00 com 54% de argamassa | | 58,0 | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 38,4 | 36,3 | 34,9 | 33,2 | 31,5 | 28,6 | 26,5 | 54,4 | 0,94 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,2 | 36,0 | 34,8 | 33,5 | 32,0 | 29,4 | 27,4 | - | |
| 1:3,00 com 60% de argamassa | | 55,7 | 35,8 | 35,0 | 34,1 | 32,8 | 31,5 | 28,3 | 25,8 | 56,1 | 1,01 |
| | | | 36,2 | 35,0 | 33,9 | 32,6 | 31,0 | 28,9 | 26,2 | 54,3 | 0,97 |
| | | | 37,0 | 35,4 | 33,8 | 32,4 | 30,6 | 29,7 | 27,2 | 56,8 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,3 | 35,1 | 33,9 | 32,6 | 31,0 | 29,0 | 26,4 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:3,00 com 48% de argamassa | 150 | 66,2 | 37,9 | 37,6 | 36,3 | 35,4 | 34,2 | 33,1 | 31,7 | 66,0 | 1,00 |
| | | | 38,3 | 37,3 | 36,4 | 35,6 | 34,3 | 32,9 | 31,2 | 65,1 | 0,98 |
| | | | 38,0 | 36,5 | 35,5 | 34,8 | 33,7 | 32,5 | 30,9 | 68,1 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 38,1 | 37,1 | 36,1 | 35,3 | 34,1 | 32,8 | 31,3 | - | |
| 1:3,00 com 54% de argamassa | | 68,6 | 36,1 | 35,2 | 35,0 | 34,9 | 33,9 | 32,7 | 32,5 | 69,6 | 1,01 |
| | | | 37,6 | 37,0 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 65,3 | 0,95 |
| | | | 37,4 | 36,5 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 70,8 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,0 | 36,2 | 35,6 | 34,9 | 33,6 | 32,4 | 31,8 | - | |
| 1:3,00 com 60% de argamassa | | 67,5 | 36,3 | 35,9 | 35,5 | 33,9 | 32,2 | 31,0 | 29,4 | 69,5 | 1,03 |
| | | | 36,5 | 35,4 | 34,8 | 33,6 | 32,3 | 31,2 | 29,4 | 66,6 | 0,99 |
| | | | 36,2 | 35,0 | 34,5 | 33,4 | 32,2 | 31,4 | 29,7 | 64,0 | 0,95 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,3 | 35,4 | 34,9 | 33,6 | 32,2 | 31,2 | 29,5 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:5,00 com 48% de argamassa | 14 | 48,2 | 42,1 | 40,0 | 38,3 | 36,8 | 35,1 | 33,7 | 31,7 | 54,1 | 1,12 |
| | | | 40,1 | 38,3 | 36,7 | 35,2 | 33,3 | 31,4 | 29,4 | 55,3 | 1,15 |
| | | | 40,6 | 39,0 | 37,9 | 36,4 | 34,8 | 33,3 | 30,9 | 50,6 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,9 | 39,1 | 37,6 | 36,1 | 34,4 | 32,8 | 30,7 | - | |
| 1:5,00 com 54% de argamassa | | 49,4 | 40,6 | 39,4 | 36,4 | 34,0 | 31,8 | 29,2 | 28,6 | 52,9 | 1,07 |
| | | | 40,4 | 38,4 | 37,5 | 36,6 | 34,4 | 31,9 | 27,8 | 51,5 | 1,04 |
| | | | 42,8 | 38,3 | 35,7 | 32,5 | 31,0 | 28,6 | 26,2 | 50,5 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,3 | 38,7 | 36,5 | 34,4 | 32,4 | 29,9 | 27,5 | - | |
| 1:5,00 com 60% de argamassa | | 51,0 | 43,2 | 40,7 | 38,5 | 33,8 | 31,0 | 29,8 | 27,0 | 51,9 | 1,02 |
| | | | 37,4 | 36,3 | 35,3 | 35,1 | 32,5 | 30,9 | 28,3 | 52,5 | 1,03 |
| | | | 39,3 | 37,8 | 36,3 | 34,9 | 33,5 | 28,7 | 26,0 | 53,2 | 1,04 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,0 | 38,3 | 36,7 | 34,6 | 32,3 | 29,8 | 27,1 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|------------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:5,00 com 48% de argamassa | 28 | 57,4 | 38,5 | 37,6 | 36,7 | 38,0 | 36,7 | 34,9 | 33,7 | 59,3 | 1,03 |
| | | | 42,5 | 40,8 | 39,5 | 36,1 | 35,4 | 34,3 | 33,0 | 58,2 | 1,01 |
| | | | 40,3 | 39,0 | 37,7 | 37,3 | 36,0 | 35,3 | 33,6 | 51,0 | 0,89 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,3 | 39,1 | 38,0 | 37,1 | 36,0 | 34,8 | 33,4 | - | |
| 1:5,00 com 54% de argamassa | | 56,7 | 40,7 | 39,8 | 38,4 | 37,3 | 35,9 | 34,5 | 32,1 | 57,2 | 1,01 |
| | | | 39,3 | 38,7 | 37,4 | 36,3 | 34,9 | 33,3 | 31,0 | 55,5 | 0,98 |
| | | | 39,6 | 38,9 | 37,1 | 35,9 | 34,5 | 32,6 | 29,9 | 59,3 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 39,9 | 39,1 | 37,6 | 36,5 | 35,1 | 33,5 | 31,0 | - | |
| 1:5,00 com 60% de argamassa | | 53,4 | 41,0 | 40,1 | 38,2 | 35,5 | 34,5 | 32,1 | 30,3 | 59,2 | 1,11 |
| | | | 38,0 | 37,5 | 36,6 | 38,1 | 36,2 | 34,5 | 31,1 | 58,6 | 1,10 |
| | | | 38,7 | 38,4 | 38,3 | 36,2 | 34,4 | 32,3 | 27,8 | 55,0 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 39,2 | 38,7 | 37,7 | 36,6 | 35,0 | 33,0 | 29,7 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|------------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:5,00 com 48% de argamassa | 150 | 67,9 | 40,6 | 39,9 | 37,6 | 37,4 | 36,6 | 35,3 | 34,0 | 69,7 | 1,03 |
| | | | 43,3 | 40,7 | 40,5 | 40,0 | 39,8 | 38,4 | 37,4 | 66,4 | 0,98 |
| | | | 41,5 | 41,1 | 40,5 | 40,6 | 37,7 | 37,5 | 34,3 | 68,3 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,8 | 40,6 | 39,5 | 39,3 | 38,0 | 37,1 | 35,2 | - | |
| 1:5,00 com 54% de argamassa | | 69,1 | 40,9 | 39,9 | 39,5 | 38,0 | 37,9 | 35,3 | 33,7 | 71,8 | 1,04 |
| | | | 40,5 | 40,3 | 38,9 | 38,8 | 36,5 | 35,5 | 33,2 | 69,0 | 1,00 |
| | | | 43,5 | 42,3 | 41,5 | 39,3 | 39,3 | 36,0 | 34,1 | 70,2 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,6 | 40,8 | 40,0 | 38,7 | 37,9 | 35,6 | 33,7 | - | |
| 1:5,00 com 60% de argamassa | | 68,3 | 38,4 | 37,9 | 37,1 | 36,3 | 35,1 | 33,7 | 31,8 | 69,9 | 1,02 |
| | | | 41,0 | 39,8 | 38,4 | 37,1 | 35,8 | 34,2 | 32,2 | 71,6 | 1,05 |
| | | | 44,8 | 41,9 | 40,0 | 38,3 | 35,7 | 34,5 | 32,9 | 66,4 | 0,97 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,4 | 39,9 | 38,5 | 37,2 | 35,5 | 34,1 | 32,3 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 com 48% de argamassa | 14 | 45,8 | 38,9 | 36,9 | 34,8 | 33,0 | 30,9 | 28,6 | 25,7 | 47,6 | 1,04 |
| | | | 42,4 | 39,8 | 37,6 | 35,5 | 33,8 | 31,8 | 29,2 | 45,1 | 0,98 |
| | | | 41,3 | 38,9 | 37,0 | 34,8 | 32,8 | 30,3 | 27,2 | 46,9 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,9 | 38,5 | 36,5 | 34,4 | 32,5 | 30,2 | 27,4 | - | |
| 1:7,00 com 54% de argamassa | | 47,3 | 40,8 | 40,4 | 38,4 | 36,6 | 34,1 | 32,5 | 30,6 | 49,4 | 1,04 |
| | | | 43,1 | 40,4 | 38,0 | 36,5 | 34,0 | 32,7 | 30,7 | 47,0 | 0,99 |
| | | | 40,6 | 39,7 | 38,8 | 36,9 | 35,0 | 31,9 | 29,1 | 44,1 | 0,93 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,5 | 40,2 | 38,4 | 36,7 | 34,4 | 32,4 | 30,1 | - | |
| 1:7,00 com 60% de argamassa | | 44,5 | 37,0 | 35,4 | 33,6 | 31,8 | 29,8 | 27,3 | 24,0 | 42,6 | 0,96 |
| | | | 38,3 | 36,5 | 34,6 | 32,7 | 30,7 | 28,6 | 25,9 | 45,7 | 1,03 |
| | | | 37,1 | 36,0 | 34,5 | 32,9 | 31,0 | 28,7 | 26,3 | 41,6 | 0,93 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,5 | 36,0 | 34,2 | 32,5 | 30,5 | 28,2 | 25,4 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|-----------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 com 48% de argamassa | 28 | 50,2 | 41,1 | 42,5 | 36,5 | 34,8 | 32,8 | 30,8 | 28,0 | 46,7 | 0,92 |
| | | | 43,9 | 41,6 | 39,4 | 36,5 | 34,5 | 32,7 | 30,0 | 50,8 | 1,01 |
| | | | 44,1 | 42,0 | 39,8 | 38,1 | 36,0 | 33,9 | 31,5 | 49,8 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 43,0 | 40,7 | 38,6 | 36,5 | 34,4 | 32,5 | 29,8 | - | |
| 1:7,00 com 54% de argamassa | | 52,8 | 45,1 | 42,9 | 40,5 | 38,3 | 36,7 | 35,4 | 33,5 | 51,0 | 0,97 |
| | | | 44,7 | 42,2 | 40,4 | 38,7 | 36,4 | 34,7 | 32,6 | 53,5 | 1,01 |
| | | | 43,8 | 41,4 | 38,9 | 38,0 | 37,4 | 35,2 | 33,3 | 50,9 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,5 | 42,2 | 39,9 | 38,3 | 36,8 | 35,1 | 33,1 | - | |
| 1:7,00 com 60% de argamassa | | 47,9 | 40,0 | 38,0 | 36,7 | 35,0 | 33,1 | 31,0 | 28,2 | 48,6 | 1,01 |
| | | | 40,0 | 37,8 | 35,9 | 34,2 | 32,3 | 30,0 | 27,7 | 47,7 | 1,00 |
| | | | 41,2 | 39,1 | 36,8 | 34,9 | 32,7 | 31,0 | 27,8 | 47,4 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,4 | 38,3 | 36,5 | 34,7 | 32,7 | 30,7 | 27,9 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|------------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:7,00 com 48% de argamassa | 150 | 60,3 | 44,4 | 42,2 | 39,8 | 38,2 | 36,1 | 34,5 | 31,9 | 60,8 | 1,01 |
| | | | 43,4 | 42,8 | 41,4 | 39,7 | 37,5 | 34,7 | 34,1 | 61,9 | 1,03 |
| | | | 42,9 | 41,7 | 40,4 | 38,4 | 37,5 | 34,7 | 33,9 | 57,1 | 0,95 |
| | | E_{cs} (médio) | 43,6 | 42,2 | 40,5 | 38,8 | 37,0 | 34,6 | 33,3 | - | |
| 1:7,00 com 54% de argamassa | | 63,9 | 45,9 | 43,4 | 41,9 | 40,2 | 38,8 | 37,0 | 35,5 | 64,9 | 1,02 |
| | | | 40,8 | 40,3 | 39,5 | 38,9 | 37,3 | 35,7 | 34,1 | 60,9 | 0,95 |
| | | | 45,9 | 45,1 | 43,3 | 41,0 | 39,3 | 37,8 | 36,6 | 61,6 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,2 | 42,9 | 41,6 | 40,0 | 38,5 | 36,8 | 35,4 | - | |
| 1:7,00 com 60% de argamassa | | 57,5 | 43,5 | 42,4 | 41,4 | 39,6 | 37,6 | 35,2 | 32,5 | 60,6 | 1,05 |
| | | | 42,7 | 42,6 | 39,6 | 38,1 | 36,9 | 34,5 | 32,1 | 56,4 | 0,98 |
| | | | 40,9 | 39,3 | 38,4 | 37,3 | 35,7 | 33,9 | 31,6 | 58,5 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 42,4 | 41,4 | 39,8 | 38,3 | 36,7 | 34,5 | 32,1 | - | |

APÊNDICE H – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: TIPO DO AGREGADO GRAÚDO

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef} / f_c$ | |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|--------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 com Granito volume absoluto constante | 14 | 47,5 | 23,4 | 23,2 | 22,9 | 22,4 | 22,0 | 21,0 | 18,6 | 45,4 | 0,96 |
| | | | 25,6 | 24,6 | 23,9 | 23,2 | 21,9 | 20,1 | 17,7 | 45,7 | 0,96 |
| | | | 25,5 | 24,6 | 23,7 | 23,1 | 21,2 | 18,9 | 16,2 | 43,4 | 0,91 |
| | | E_{cs} (médio) | 24,8 | 24,1 | 23,5 | 22,9 | 21,7 | 20,0 | 17,5 | - | |
| 1:3,00 com Basalto volume absoluto constante | | 46,9 | 29,6 | 28,4 | 27,3 | 25,9 | 22,4 | 21,2 | 19,2 | 46,7 | 1,00 |
| | | | 26,5 | 26,1 | 25,3 | 24,5 | 24,4 | 22,7 | 20,4 | 42,7 | 0,91 |
| | | | 27,1 | 26,1 | 25,2 | 24,2 | 23,8 | 22,4 | 20,3 | 48,2 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 27,7 | 26,9 | 25,9 | 24,9 | 23,5 | 22,1 | 20,0 | - | |
| 1:3,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 45,0 | 35,1 | 33,2 | 32,1 | 31,0 | 29,3 | 27,7 | 26,0 | 48,4 | 1,08 |
| | | | 34,5 | 32,6 | 31,1 | 29,8 | 28,4 | 26,5 | 24,4 | 46,2 | 1,03 |
| | | | 34,0 | 32,0 | 30,7 | 29,3 | 28,2 | 25,7 | 23,8 | 48,2 | 1,07 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,5 | 32,6 | 31,3 | 30,0 | 28,6 | 26,6 | 24,7 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef} / f_c$ | |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|--------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 com Granito volume absoluto constante | 28 | 48,4 | 24,5 | 24,4 | 24,3 | 23,5 | 21,5 | 20,8 | 19,6 | 48,9 | 1,01 |
| | | | 27,4 | 27,3 | 25,7 | 23,6 | 21,9 | 20,7 | 19,4 | 47,5 | 0,98 |
| | | | 25,1 | 24,7 | 24,1 | 22,6 | 22,6 | 22,1 | 20,6 | 49,8 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 25,7 | 25,5 | 24,7 | 23,2 | 22,0 | 21,2 | 19,9 | - | |
| 1:3,00 com Basalto volume absoluto constante | | 49,0 | 26,1 | 25,8 | 25,1 | 23,9 | 24,5 | 22,8 | 20,6 | 49,2 | 1,00 |
| | | | 29,5 | 28,4 | 27,3 | 25,5 | 23,3 | 22,0 | 20,4 | 48,7 | 0,99 |
| | | | 30,5 | 28,3 | 27,1 | 25,3 | 22,9 | 21,2 | 20,5 | 51,7 | 1,06 |
| | | E_{cs} (médio) | 28,7 | 27,5 | 26,5 | 24,9 | 23,6 | 22,0 | 20,5 | - | |
| 1:3,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 48,1 | 35,6 | 33,6 | 31,2 | 30,3 | 28,8 | 26,7 | 24,5 | 51,1 | 1,06 |
| | | | 31,4 | 31,0 | 29,8 | 28,8 | 27,6 | 26,1 | 23,9 | 50,0 | 1,04 |
| | | | 38,2 | 36,6 | 33,4 | 32,3 | 30,1 | 28,3 | 25,6 | 49,2 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,1 | 33,7 | 31,5 | 30,5 | 28,8 | 27,0 | 24,7 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:3,00 com Granito volume absoluto constante | 150 | 60,3 | 29,6 | 29,0 | 29,0 | 27,4 | 26,7 | 26,2 | 24,7 | 62,2 | 1,03 |
| | | | 28,5 | 28,2 | 28,1 | 27,0 | 26,5 | 25,5 | 24,8 | 58,8 | 0,98 |
| | | | 29,5 | 29,4 | 28,5 | 28,1 | 27,0 | 26,0 | 24,0 | 59,9 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 29,2 | 28,9 | 28,5 | 27,5 | 26,7 | 25,9 | 24,5 | - | |
| 1:3,00 com Basalto volume absoluto constante | | 60,6 | 31,8 | 29,6 | 29,6 | 28,8 | 28,3 | 27,3 | 25,9 | 58,9 | 0,97 |
| | | | 30,3 | 30,3 | 30,1 | 29,5 | 28,7 | 27,8 | 26,7 | 60,1 | 0,99 |
| | | | 31,2 | 30,8 | 29,6 | 28,6 | 27,7 | 27,2 | 25,6 | 62,7 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 31,1 | 30,2 | 29,8 | 29,0 | 28,2 | 27,4 | 26,1 | - | |
| 1:3,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 62,3 | 42,3 | 41,2 | 39,5 | 38,0 | 36,1 | 33,5 | 29,0 | 63,8 | 1,02 |
| | | | 36,0 | 35,5 | 35,1 | 34,3 | 32,9 | 31,4 | 28,4 | 62,5 | 1,00 |
| | | | 38,0 | 37,3 | 37,2 | 35,4 | 33,9 | 32,0 | 29,3 | 59,2 | 0,95 |
| | | E_{cs} (médio) | 38,8 | 38,0 | 37,3 | 35,9 | 34,3 | 32,3 | 28,9 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:5,00 com Granito volume absoluto constante | 14 | 49,5 | 28,1 | 27,3 | 26,1 | 24,9 | 24,0 | 22,7 | 20,9 | 49,7 | 1,00 |
| | | | 27,0 | 26,1 | 24,8 | 24,0 | 23,1 | 21,6 | 19,6 | 45,5 | 0,92 |
| | | | 28,3 | 27,7 | 26,4 | 26,1 | 25,3 | 24,0 | 22,2 | 47,6 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 27,8 | 27,0 | 25,8 | 25,0 | 24,1 | 22,8 | 20,9 | - | |
| 1:5,00 com Basalto volume absoluto constante | | 49,6 | 34,1 | 33,5 | 30,8 | 29,2 | 26,9 | 25,3 | 22,5 | 50,4 | 1,02 |
| | | | 32,4 | 29,8 | 28,4 | 27,6 | 26,7 | 25,4 | 23,3 | 53,0 | 1,07 |
| | | | 31,4 | 29,4 | 28,3 | 27,5 | 26,9 | 25,5 | 23,8 | 50,8 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 32,6 | 30,9 | 29,2 | 28,1 | 26,8 | 25,4 | 23,2 | - | |
| 1:5,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 48,0 | 38,5 | 36,3 | 34,1 | 31,8 | 29,4 | 27,1 | 23,8 | 47,5 | 0,99 |
| | | | 37,7 | 36,5 | 34,1 | 32,8 | 30,8 | 28,5 | 25,8 | 49,7 | 1,04 |
| | | | 36,4 | 35,1 | 34,9 | 32,1 | 29,6 | 27,6 | 25,6 | 49,0 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,5 | 36,0 | 34,4 | 32,2 | 29,9 | 27,7 | 25,1 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:5,00 com Granito volume absoluto constante | 28 | 50,4 | 28,7 | 28,0 | 27,3 | 26,0 | 25,1 | 23,9 | 22,5 | 49,1 | 0,97 |
| | | | 31,2 | 27,6 | 27,6 | 26,2 | 25,2 | 23,6 | 22,0 | 51,0 | 1,01 |
| | | | 32,3 | 29,8 | 28,5 | 26,5 | 26,2 | 24,0 | 22,2 | 49,4 | 0,98 |
| | | E_{cs} (médio) | 30,7 | 28,5 | 27,8 | 26,2 | 25,5 | 23,8 | 22,2 | - | |
| 1:5,00 com Basalto volume absoluto constante | | 53,1 | 34,1 | 34,2 | 32,2 | 30,1 | 27,0 | 25,0 | 24,5 | 55,1 | 1,04 |
| | | | 32,4 | 31,5 | 29,6 | 28,5 | 27,2 | 25,6 | 23,9 | 50,7 | 0,95 |
| | | | 31,4 | 29,8 | 28,9 | 28,0 | 26,7 | 25,3 | 23,7 | 53,6 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 32,6 | 31,8 | 30,2 | 28,9 | 27,0 | 25,3 | 24,0 | - | |
| 1:5,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 50,6 | 38,5 | 36,1 | 34,1 | 32,5 | 30,7 | 28,4 | 24,7 | 50,6 | 1,00 |
| | | | 37,9 | 37,0 | 34,9 | 32,6 | 30,6 | 28,6 | 25,4 | 56,5 | 1,12 |
| | | | 39,2 | 35,0 | 34,5 | 33,2 | 31,2 | 29,1 | 25,1 | 52,2 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 38,5 | 36,0 | 34,5 | 32,8 | 30,8 | 28,7 | 25,1 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:5,00 com Granito volume absoluto constante | 150 | 56,3 | 34,0 | 32,2 | 31,0 | 30,0 | 29,5 | 28,3 | 26,6 | 58,2 | 1,03 |
| | | | 34,5 | 33,4 | 30,2 | 28,8 | 28,6 | 28,5 | 26,7 | 55,6 | 0,99 |
| | | | 31,1 | 30,5 | 29,4 | 27,9 | 26,8 | 26,4 | 25,9 | 59,7 | 1,06 |
| | | E_{cs} (médio) | 33,2 | 32,0 | 30,2 | 28,9 | 28,3 | 27,7 | 26,4 | - | |
| 1:5,00 com Basalto volume absoluto constante | | 58,0 | 37,6 | 34,8 | 34,6 | 34,2 | 33,7 | 32,5 | 31,1 | 56,9 | 1,00 |
| | | | 36,7 | 34,4 | 34,0 | 33,5 | 32,2 | 30,6 | 29,8 | 57,8 | 1,01 |
| | | | 34,9 | 33,5 | 33,1 | 32,6 | 31,2 | 30,0 | 29,0 | 58,5 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,4 | 34,2 | 33,9 | 33,4 | 32,4 | 31,0 | 30,0 | - | |
| 1:5,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 57,9 | 41,0 | 39,9 | 38,5 | 37,4 | 36,1 | 33,7 | 31,2 | 53,3 | 0,92 |
| | | | 38,6 | 38,0 | 37,6 | 36,5 | 35,8 | 33,9 | 31,6 | 58,3 | 1,01 |
| | | | 42,6 | 40,6 | 38,9 | 38,2 | 36,7 | 34,6 | 33,3 | 59,3 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 40,7 | 39,5 | 38,3 | 37,4 | 36,2 | 34,1 | 32,0 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 com Granito volume absoluto constante | 14 | 44,9 | 29,2 | 27,8 | 27,2 | 25,3 | 23,8 | 22,3 | 20,1 | 44,8 | 1,00 |
| | | | 30,0 | 28,2 | 26,6 | 25,2 | 23,7 | 21,9 | 19,7 | 45,7 | 1,02 |
| | | | 26,6 | 26,3 | 25,9 | 24,1 | 23,6 | 21,3 | 19,2 | 44,5 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 28,6 | 27,4 | 26,6 | 24,9 | 23,7 | 21,8 | 19,7 | - | |
| 1:7,00 com Basalto volume absoluto constante | | 45,2 | 34,6 | 32,3 | 29,6 | 28,0 | 25,8 | 22,6 | 20,7 | 47,7 | 1,03 |
| | | | 37,8 | 34,6 | 32,0 | 29,0 | 27,8 | 24,2 | 23,3 | 46,9 | 1,04 |
| | | | 35,3 | 33,8 | 31,5 | 28,9 | 27,1 | 24,1 | 22,9 | 47,4 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,9 | 33,6 | 31,0 | 28,6 | 26,9 | 23,6 | 22,3 | - | |
| 1:7,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 44,7 | 38,5 | 36,2 | 33,9 | 30,7 | 28,5 | 25,8 | 22,9 | 42,9 | 0,96 |
| | | | 44,2 | 37,6 | 36,9 | 33,5 | 29,1 | 26,9 | 24,1 | 45,3 | 1,01 |
| | | | 40,8 | 37,5 | 34,3 | 30,8 | 28,2 | 25,2 | 22,5 | 44,3 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,2 | 37,1 | 35,0 | 31,7 | 28,6 | 26,0 | 23,2 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 com Granito volume absoluto constante | 28 | 46,9 | 31,3 | 29,3 | 27,5 | 26,0 | 23,8 | 23,5 | 21,6 | 44,3 | 0,94 |
| | | | 32,5 | 30,2 | 28,5 | 26,8 | 25,1 | 23,6 | 22,0 | 48,7 | 1,04 |
| | | | 29,6 | 27,7 | 26,2 | 25,1 | 23,3 | 21,7 | 20,3 | 47,7 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 31,3 | 29,1 | 27,4 | 26,0 | 24,1 | 22,9 | 21,3 | - | |
| 1:7,00 com Basalto volume absoluto constante | | 48,0 | 37,2 | 35,0 | 32,9 | 31,9 | 30,6 | 29,1 | 27,7 | 49,8 | 1,04 |
| | | | 35,4 | 33,2 | 31,1 | 30,3 | 29,3 | 28,0 | 26,4 | 50,4 | 1,05 |
| | | | 35,9 | 33,7 | 30,7 | 29,5 | 28,2 | 26,3 | 25,3 | 51,9 | 1,08 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,2 | 34,0 | 31,6 | 30,6 | 29,4 | 27,8 | 26,5 | - | |
| 1:7,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 48,0 | 42,4 | 40,4 | 36,4 | 34,5 | 32,1 | 28,8 | 25,9 | 49,4 | 1,03 |
| | | | 43,4 | 37,9 | 37,4 | 35,4 | 31,9 | 29,0 | 26,3 | 50,8 | 1,06 |
| | | | 42,9 | 39,5 | 37,0 | 34,6 | 31,6 | 28,2 | 25,8 | 50,5 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 42,9 | 39,3 | 36,9 | 34,8 | 31,9 | 28,7 | 26,0 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|---|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:7,00 com Granito volume absoluto constante | 150 | 58,6 | 34,4 | 33,4 | 33,3 | 31,7 | 31,3 | 28,1 | 27,5 | 59,1 | 1,01 |
| | | | 32,4 | 32,2 | 31,7 | 31,2 | 31,1 | 29,8 | 28,9 | 59,7 | 1,02 |
| | | | 33,9 | 33,0 | 32,8 | 31,7 | 31,1 | 31,2 | 29,1 | 56,6 | 0,97 |
| | | E_{cs} (médio) | 33,6 | 32,9 | 32,6 | 31,5 | 31,2 | 29,7 | 28,5 | - | |
| 1:7,00 com Basalto volume absoluto constante | | 59,1 | 37,7 | 36,6 | 34,1 | 33,0 | 32,2 | 30,9 | 29,8 | 58,5 | 0,99 |
| | | | 38,5 | 36,1 | 35,6 | 35,2 | 33,6 | 32,7 | 30,2 | 61,8 | 1,05 |
| | | | 36,7 | 34,8 | 34,5 | 34,5 | 32,8 | 32,1 | 30,1 | 59,8 | 1,01 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,6 | 35,8 | 34,7 | 34,2 | 32,9 | 31,9 | 30,0 | - | |
| 1:7,00 com Diabásio volume absoluto constante | | 58,7 | 44,9 | 41,9 | 40,4 | 38,5 | 37,1 | 34,8 | 32,1 | 60,0 | 1,02 |
| | | | 45,1 | 43,1 | 40,9 | 39,5 | 37,7 | 35,4 | 34,4 | 63,0 | 1,07 |
| | | | 43,7 | 42,1 | 40,2 | 38,9 | 37,4 | 34,6 | 33,4 | 59,7 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,6 | 42,4 | 40,5 | 39,0 | 37,4 | 34,9 | 33,3 | - | |

APÊNDICE I – RESULTADOS DA SEGUNDA FASE: TIPO DE CURA

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|-------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (cura úmida) | 14 | 50,5 | 36,4 | 35,1 | 34,1 | 33,1 | 31,8 | 30,0 | 26,7 | 50,3 | 1,00 |
| | | | 31,5 | 30,6 | 30,8 | 30,3 | 30,0 | 27,9 | 25,5 | 49,2 | 0,97 |
| | | | 37,0 | 35,3 | 33,9 | 32,1 | 30,5 | 29,1 | 27,3 | 52,0 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 35,0 | 33,7 | 32,9 | 31,8 | 30,8 | 29,0 | 26,5 | - | |
| 1:5,00 (cura úmida) | | 49,4 | 40,6 | 39,4 | 36,4 | 34,0 | 31,8 | 29,2 | 28,6 | 52,9 | 1,07 |
| | | | 40,4 | 38,4 | 37,5 | 36,6 | 34,4 | 31,9 | 27,8 | 51,5 | 1,04 |
| | | | 42,8 | 38,3 | 35,7 | 32,5 | 31,0 | 28,6 | 26,2 | 50,5 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,3 | 38,7 | 36,5 | 34,4 | 32,4 | 29,9 | 27,5 | - | |
| 1:7,00 (cura úmida) | | 47,3 | 40,8 | 40,4 | 38,4 | 36,6 | 34,1 | 32,5 | 30,6 | 49,4 | 1,04 |
| | | | 43,1 | 40,4 | 38,0 | 36,5 | 34,0 | 32,7 | 30,7 | 47,0 | 0,99 |
| | | | 40,6 | 39,7 | 38,8 | 36,9 | 35,0 | 31,9 | 29,1 | 44,1 | 0,93 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,5 | 40,2 | 38,4 | 36,7 | 34,4 | 32,4 | 30,1 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|-------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (cura úmida) | 28 | 58,0 | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 36,6 | 35,8 | 34,8 | 33,6 | 32,2 | 29,8 | 27,9 | 54,0 | 0,93 |
| | | | 38,4 | 36,3 | 34,9 | 33,2 | 31,5 | 28,6 | 26,5 | 54,4 | 0,94 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,2 | 36,0 | 34,8 | 33,5 | 32,0 | 29,4 | 27,4 | - | |
| 1:5,00 (cura úmida) | | 56,7 | 40,7 | 39,8 | 38,4 | 37,3 | 35,9 | 34,5 | 32,1 | 57,2 | 1,01 |
| | | | 39,3 | 38,7 | 37,4 | 36,3 | 34,9 | 33,3 | 31,0 | 55,5 | 0,98 |
| | | | 39,6 | 38,9 | 37,1 | 35,9 | 34,5 | 32,6 | 29,9 | 59,3 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 39,9 | 39,1 | 37,6 | 36,5 | 35,1 | 33,5 | 31,0 | - | |
| 1:7,00 (cura úmida) | | 52,8 | 45,1 | 42,9 | 40,5 | 38,3 | 36,7 | 35,4 | 33,5 | 51,0 | 0,97 |
| | | | 44,7 | 42,2 | 40,4 | 38,7 | 36,4 | 34,7 | 32,6 | 53,5 | 1,01 |
| | | | 43,8 | 41,4 | 38,9 | 38,0 | 37,4 | 35,2 | 33,3 | 50,9 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,5 | 42,2 | 39,9 | 38,3 | 36,8 | 35,1 | 33,1 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|-------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:3,00 (cura úmida) | 150 | 68,6 | 36,1 | 35,2 | 35,0 | 34,9 | 33,9 | 32,7 | 32,5 | 69,6 | 1,01 |
| | | | 37,6 | 37,0 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 65,3 | 0,95 |
| | | | 37,4 | 36,5 | 35,9 | 34,9 | 33,4 | 32,3 | 31,4 | 70,8 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,0 | 36,2 | 35,6 | 34,9 | 33,6 | 32,4 | 31,8 | - | |
| 1:5,00 (cura úmida) | | 69,1 | 40,9 | 39,9 | 39,5 | 38,0 | 37,9 | 35,3 | 33,7 | 71,8 | 1,04 |
| | | | 40,5 | 40,3 | 38,9 | 38,8 | 36,5 | 35,5 | 33,2 | 69,0 | 1,00 |
| | | | 43,5 | 42,3 | 41,5 | 39,3 | 39,3 | 36,0 | 34,1 | 70,2 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,6 | 40,8 | 40,0 | 38,7 | 37,9 | 35,6 | 33,7 | - | |
| 1:7,00 (cura úmida) | | 63,9 | 45,9 | 43,4 | 41,9 | 40,2 | 38,8 | 37,0 | 35,5 | 64,9 | 1,02 |
| | | | 40,8 | 40,3 | 39,5 | 38,9 | 37,3 | 35,7 | 34,1 | 60,9 | 0,95 |
| | | | 45,9 | 45,1 | 43,3 | 41,0 | 39,3 | 37,8 | 36,6 | 61,6 | 0,96 |
| | | E_{cs} (médio) | 44,2 | 42,9 | 41,6 | 40,0 | 38,5 | 36,8 | 35,4 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ |
|---------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | 0,8 f_c | | |
| 1:3,00 (cura a vapor) | 14 | 47,0 | 31,2 | 30,3 | 29,9 | 29,2 | 28,3 | 25,9 | 23,2 | 47,7 | 1,01 |
| | | | 33,1 | 31,9 | 31,3 | 30,4 | 27,8 | 26,0 | 23,8 | 48,8 | 1,04 |
| | | | 32,4 | 31,5 | 30,8 | 30,1 | 30,6 | 28,1 | 25,4 | 47,8 | 1,02 |
| | | E_{cs} (médio) | 32,2 | 31,2 | 30,7 | 29,9 | 28,9 | 26,7 | 24,1 | - | |
| 1:5,00 (cura a vapor) | | 46,6 | 36,8 | 35,5 | 32,5 | 30,3 | 28,4 | 27,3 | 25,9 | 48,5 | 1,04 |
| | | | 35,3 | 33,6 | 31,3 | 29,4 | 29,7 | 28,5 | 27,0 | 47,3 | 1,02 |
| | | | 35,8 | 34,9 | 35,1 | 32,8 | 29,1 | 28,0 | 26,4 | 45,5 | 0,98 |
| | | E_{cs} (médio) | 36,0 | 34,7 | 33,0 | 30,8 | 29,1 | 27,9 | 26,4 | - | |
| 1:7,00 (cura a vapor) | | 39,2 | 37,4 | 34,5 | 34,7 | 33,7 | 32,3 | 31,1 | 29,5 | 40,1 | 1,02 |
| | | | 35,5 | 33,2 | 32,2 | 31,0 | 29,5 | 27,9 | 26,0 | 41,1 | 1,05 |
| | | | 40,8 | 37,8 | 34,2 | 33,8 | 33,1 | 31,8 | 29,8 | 40,8 | 1,04 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,9 | 35,2 | 33,7 | 32,8 | 31,6 | 30,3 | 28,4 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|---------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (cura a vapor) | 28 | 50,7 | 33,0 | 32,1 | 31,6 | 30,8 | 29,9 | 28,6 | 26,9 | 48,1 | 0,95 |
| | | | 36,5 | 34,8 | 33,5 | 32,5 | 31,3 | 29,9 | 28,3 | 50,0 | 0,99 |
| | | | 34,6 | 33,2 | 32,3 | 30,7 | 29,6 | 28,1 | 26,5 | 50,4 | 0,99 |
| | | E_{cs} (médio) | 34,7 | 33,4 | 32,5 | 31,3 | 30,3 | 28,9 | 27,2 | - | |
| 1:5,00 (cura a vapor) | | 51,7 | 39,7 | 37,4 | 36,6 | 34,7 | 32,5 | 30,2 | 27,5 | 56,4 | 1,09 |
| | | | 39,6 | 37,0 | 35,0 | 33,8 | 32,0 | 29,5 | 26,9 | 57,0 | 1,10 |
| | | | 39,5 | 38,4 | 35,5 | 34,1 | 33,9 | 31,8 | 29,4 | 55,3 | 1,07 |
| | | E_{cs} (médio) | 39,6 | 37,6 | 35,7 | 34,2 | 32,8 | 30,5 | 27,9 | - | |
| 1:7,00 (cura a vapor) | | 45,5 | 42,4 | 39,6 | 36,6 | 35,5 | 34,2 | 32,7 | 30,9 | 46,7 | 1,03 |
| | | | 38,2 | 37,4 | 38,5 | 37,3 | 36,0 | 34,6 | 33,2 | 44,7 | 0,98 |
| | | | 44,9 | 41,3 | 37,7 | 36,2 | 34,8 | 33,2 | 30,9 | 47,6 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,8 | 39,4 | 37,6 | 36,3 | 35,0 | 33,5 | 31,7 | - | |

| Composição | Idade (dias) | Resistência à compressão média - f_c (MPa) | Módulo de deformação (GPa) | | | | | | Resistência à compressão - $f_{c,ef}$ (MPa) | Relação $f_{c,ef}/f_c$ | |
|---------------------------------|--------------|--|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|------------------------|-----------|
| | | | 0,2 f_c | 0,3 f_c | 0,4 f_c | 0,5 f_c | 0,6 f_c | 0,7 f_c | | | 0,8 f_c |
| 1:3,00 (cura a vapor) | 150 | 63,8 | 38,8 | 36,4 | 34,9 | 33,4 | 30,8 | 30,1 | 29,0 | 64,6 | 1,01 |
| | | | 36,9 | 35,0 | 33,9 | 32,6 | 30,5 | 30,3 | 28,2 | 68,9 | 1,08 |
| | | | 36,5 | 32,6 | 31,5 | 30,9 | 30,2 | 29,6 | 28,3 | 65,8 | 1,03 |
| | | E_{cs} (médio) | 37,4 | 34,7 | 33,4 | 32,3 | 30,5 | 30,0 | 28,5 | - | |
| 1:5,00 (cura a vapor) | | 64,5 | 37,8 | 37,3 | 37,0 | 35,1 | 34,5 | 33,4 | 32,0 | 63,5 | 0,98 |
| | | | 46,6 | 40,1 | 39,1 | 36,6 | 36,2 | 34,2 | 32,9 | 65,5 | 1,02 |
| | | | 39,6 | 38,9 | 38,6 | 36,4 | 34,8 | 34,0 | 32,3 | 67,5 | 1,05 |
| | | E_{cs} (médio) | 41,3 | 38,8 | 38,2 | 36,0 | 35,2 | 33,9 | 32,4 | - | |
| 1:7,00 (cura a vapor) | | 52,8 | 41,3 | 39,0 | 37,1 | 34,4 | 33,0 | 30,7 | 28,8 | 48,9 | 0,93 |
| | | | 42,5 | 40,9 | 38,2 | 34,4 | 32,6 | 30,9 | 28,9 | 54,3 | 1,03 |
| | | | 43,2 | 42,2 | 36,4 | 35,8 | 33,2 | 31,3 | 29,1 | 51,5 | 0,98 |
| | | E_{cs} (médio) | 42,3 | 40,7 | 37,2 | 34,9 | 32,9 | 31,0 | 28,9 | - | |