

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E
INFRAESTRUTURA

CRISTIANE CARINE DOS SANTOS

PROPOSTA DE MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE
ESTÁTICO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND

Porto Alegre

2020

CRISTIANE CARINE DOS SANTOS

**PROPOSTA DE MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE
ESTÁTICO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito a obtenção do título de doutora em Engenharia Civil, modalidade acadêmica.

Orientadora: Prof^a Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Coorientador: Prof^o. Dr. Geraldo Cechella Isaia

Porto Alegre

2020

CRISTIANE CARINE DOS SANTOS

**PROPOSTA DE MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE
ESTÁTICO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada como requisito para a obtenção do título de doutora em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura.

Aprovada em 21 de dezembro de 2020.

Profa. Dra. Denise Carpena Coitinho Dal Molin - Orientadora

Prof. Dr. Geraldo Cechella Isaia – Coorientador

Prof. Dra. Mônica Regina Garcez – PPGCI/UFRGS

Prof. Dr. Cláudio de Souza Kazmierczak - UNISINOS

Prof. Dr. André Lübeck - UFSM

CIP - Catalogação na Publicação

Santos, Cristiane Carine dos
PROPOSTA DE MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE
ELASTICIDADE ESTÁTICO DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND
/ Cristiane Carine dos Santos. -- 2020.
211 f.
Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin.

Coorientador: Geraldo Cechella Isaia.

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, 2020.

1. Concreto. 2. Volume de pasta. 3. Forma do
agregado graúdo. 4. Módulo de elasticidade do agregado
graúdo. I. Dal Molin, Denise Carpena Coitinho, orient.
II. Isaia, Geraldo Cechella, coorient. III. Título.

*Aos meus pais e ao meu irmão por todo apoio,
incentivo e por acreditarem em mim...*

*Por todo amor, apoio, companheirismo,
compressão e paciência, ao meu noivo Gustavo
Isac de Freitas...*

AGRADECIMENTOS

Ao final dessa importante etapa da minha vida, não conseguirei agradecer à todos que contribuíram para que eu alcançasse mais este objetivo, pois foram muitas pessoas que abdicaram de seu tempo para me auxiliar e contribuir para que tudo desse certo. Portanto, agradeço imensamente a todos que de alguma forma ou de outra me auxiliaram no decorrer deste trabalho, e destaco aqui alguns agradecimentos especiais:

À Deus, por ter abençoado todos os dias da minha vida, por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

Aos meus pais e meu irmão pela compreensão da minha ausência, pelo incentivo e apoio ao estudo como a melhor herança.

Ao meu noivo Gustavo não tenho palavras suficientes que expressem a minha gratidão, agradeço pela paciência, incentivo, apoio, abdicção de suas tarefas para me auxiliar com os ensaios laboratoriais, pelo amor e compreensão, e por estar ao meu lado em todas as etapas deste trabalho.

A minha professora orientadora Denise Carpena Coitinho Dal Molin, pela oportunidade, ensinamentos, paciência, por não ter medido esforços para me auxiliar na concretização deste objetivo. Meu sentimento é de gratidão e admiração pela pessoa e profissional que és.

Ao meu professor coorientador Geraldo Cechella Isaia, por todo conhecimento compartilhado, apoio e incentivo na realização de mais este objetivo. Muito grata por continuar a compartilhar seus conhecimentos, enorme admiração pessoal e profissional por você.

Ao NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, pela oportunidade e todo o conhecimento repassado por meio de seus professores e colegas da pós-graduação.

Aos professores André Lübeck, Luiz Felipe Lopes, Marco Pozzobon, Andréa Nummer e a Jordana Moura Caetano pelo auxílio em diferentes etapas do trabalho.

Aos professores banca de qualificação e defesa que contribuíram com seus conhecimentos para a realização e adequação do trabalho.

Ao Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria pela infraestrutura disponibilizada. E à doutoranda Silvane Santos da Silva pelo auxílio nos ensaios com a prensa INSTRON.

Agradeço as empresas:

- Conpasul de Itaara, Estrela, Santa Cruz e Butiá, por disponibilizar os agregados graúdos e miúdo.

- Mônego Mineração pela doação do agregado graúdo de calcário.

- DAF Indústria Química pela doação do aditivo para a produção dos concretos.
- Primorati e a Telha Nobre pela doação de parte do cimento utilizado no trabalho.

Às demais pessoas que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho ou participaram da minha vida, e que, por ventura, eu tenha me esquecido de agradecer.

MUITO OBRIGADA!!!

"Deus nos concede, a cada dia, uma página de vida nova no livro do tempo. Aquilo que colocarmos nela, corre por nossa conta."

Chico Xavier

RESUMO

SANTOS, C. C. **Proposta de Modelo de Previsão do Módulo de Elasticidade Estático 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. 211 fls, 2020.

As estruturas de concreto armado são muito utilizadas, tanto em nível nacional como internacional, fazendo parte do padrão das estruturas de construção civil. Dessa forma é de fundamental importância conhecer as propriedades do concreto, principalmente a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Para estimar o módulo de elasticidade do concreto existem, além da NBR 6118 e normas internacionais, vários estudos conhecidos na literatura, entretanto a bibliografia aponta não ter confiança nesses modelos, que muitas vezes resultam em valores superestimados e, em outras situações, subestimados. O presente trabalho objetiva propor um modelo que contribua para a previsão do módulo de elasticidade do concreto a partir das variáveis selecionadas, como o volume de pasta, a relação água/cimento (resistência à compressão), a forma e o módulo de elasticidade do agregado graúdo. Após a seleção e estudo dos diferentes materiais utilizados para a produção dos concretos, foi possível produzir as diversas misturas e obter os resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade. A partir do estudo do modelo para a previsão do módulo, os resultados confirmaram que as variáveis selecionadas e suas interações possuem influência significativa sobre o módulo de elasticidade do concreto, e dessa maneira foram incluídas no modelo de previsão proposto pelo presente trabalho. Como esperado, a variável independente que apresentou maior significância estatística para a resistência à compressão foi a relação água/cimento, já para o módulo de elasticidade a variável de maior impacto foi o volume de pasta, para todas as situações analisadas. A validação do modelo indica a viabilidade de aplicação do mesmo para a previsão do módulo. Quando se compara com os demais modelos propostos por normas e os conhecidos na literatura, o modelo da presente pesquisa se mostra entre os melhores modelos, com os menores erros e melhores coeficientes estatísticos, indicando eficiência na utilização deste modelo para a previsão do módulo de elasticidade do concreto.

Palavras-chave: Concreto. Volume de pasta. Resistência característica à compressão. Forma do agregado graúdo. Módulo de elasticidade do agregado graúdo.

ABSTRACT

SANTOS, C. C. **Proposed Prediction Model for the Portland Cement Concrete Static Elasticity Module.** Doctoral Thesis in Engineering - Graduate Program in Civil Engineering: Civil Construction and Infrastructure, UFRGS, Porto Alegre / RS. 211 pages, 2020.

Reinforced concrete structures are widely used, both nationally and internationally, as part of the standard for civil construction structures. Thus, it is of fundamental importance to know the properties of concrete, especially the compressive strength and the modulus of elasticity. To estimate the modulus of elasticity of concrete, there are, in addition to NBR 6118 and international standards, several studies known in the literature, however the bibliography points to not having confidence in these models, which often result in overestimated values and, in other situations, underestimated. The present work aims to propose a model that contributes to the prediction of the modulus of elasticity of concrete from the selected variables, such as the volume of paste, the water / cement ratio (compressive strength), the shape and modulus of elasticity of the aggregate. After the selection and study of the different materials used for the production of the concretes, it was possible to produce the various mixtures and obtain the results of compressive strength and modulus of elasticity. From the study of the model for the prediction of the module, the results confirmed that the selected variables and their interactions have a significant influence on the modulus of elasticity of the concrete, and thus were included in the forecast model proposed by the present work. As expected, the independent variable that showed the highest statistical significance for compressive strength was the water / cement ratio, whereas for the elasticity module the variable with the greatest impact was the paste volume, for all situations analyzed. The validation of the model indicates the feasibility of applying it for the module forecast. When compared with the other models proposed by standards and those known in the literature, the model of the present research shows itself among the best models, with the lowest errors and the best statistical coefficients, indicating efficiency in the use of this model to predict the elasticity module of the concrete.

Key-words: Concrete. Folder volume. Characteristic resistance to compression. Coarse aggregate shape. Modulus of elasticity of coarse aggregate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 - Módulo de elasticidade estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para diferentes classes de resistência à compressão axial do concreto	22
Figura 1. 2- Comparação entre módulo de elasticidade experimental e valores estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014)	22
Figura 1. 3 - Comparação dos resultados experimentais de E_{ci} com os valores obtidos pelas equações propostas pelas normas	24
Figura 1. 4 - Correlações entre f_c e E_{ci} com utilização da brita basalto	25
Figura 1. 5 - Comparação do módulo de elasticidade experimental e teórico.....	27
Figura 2. 1 - Previsão do módulo de elasticidade do concreto baseado na resistência à compressão, de acordo com as normas nacionais e internacionais	32
Figura 2. 2 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto com diferentes modelos x dados experimentais	32
Figura 2. 3 - Curva tensão deformação de concretos	34
Figura 2. 4 - Curvas de tensão x deformação dos materiais considerados como: (a) frágil; (b) quase frágil; (c) dúctil.....	35
Figura 2. 5 - Comparação entre resultados de módulo de deformação obtidos experimentalmente e pela equação da NBR 6118 (ABNT,2003)	42
Figura 2. 6 - Comparação entre resultados de módulo de deformação obtidos experimentalmente e pela equação da ACI 318	43
Figura 2. 7 – Comparação do módulo de elasticidade entre concretos plásticos e autoadensável x normas internacionais	44
Figura 2. 8 - Resistência à compressão x módulo de elasticidade.....	45
Figura 2. 9 - Módulo de elasticidade experimental x modelos de previsão propostos.....	48
Figura 2. 10 - Relação entre o módulo de elasticidade experimental e estimado.....	49
Figura 2. 11 - Dispersão dos resultados experimentais e estimados para o módulo de elasticidade do concreto	50
Figura 3. 1 - Fatores que influenciam no módulo de deformação do concreto	51
Figura 3. 2- Modelo da estrutura da pasta – Pontos cheios: partículas de gel; Espaços intersticiais: poros de gel; Espaços com C: poros capilares	53
Figura 3. 3- Dimensões dos componentes do concreto e respectivos módulos de elasticidade esperados	54
Figura 3. 4 - Influência da relação água/cimento no módulo de deformação do concreto.....	56
Figura 3. 5 - Módulo de elasticidade x relação água/cimento	56
Figura 3. 6 - Relação água/cimento e o módulo de elasticidade do concreto.....	57
Figura 3. 7 - Influência do volume de pasta e agregados sobre o módulo de deformação do concreto	57
Figura 3. 8 - Tensão deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto	59
Figura 3. 9- (a) Representação da zona de transição do concreto e (b) MEV por elétrons retroespalhados da zona de transição pasta-agregado do concreto com basalto	59
Figura 3. 10- Módulo de elasticidade do concreto com agregados de andesito e granito	61
Figura 3. 11 - Influência dos agregados no módulo de elasticidade do concreto.....	63
Figura 3. 12 - Módulo de elasticidade do agregado graúdo x módulo de elasticidade da argamassa x módulo de elasticidade do concreto	64
Figura 3. 13- Porosidade do agregado x módulo de elasticidade do concreto	65

Figura 3. 14 - Módulo de elasticidade do concreto preparado com diferentes tipos de agregados	67
Figura 3. 15 - Influência da natureza do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto	67
Figura 3. 16- Teor de agregado x módulo de elasticidade do concreto com abatimento constante e relação a/c variável	68
Figura 3. 17- Módulo de elasticidade x teor de agregado com relação a/c constante	69
Figura 3. 18 - Influência do teor de agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto em função do tempo de hidratação	69
Figura 3. 19 - Regressão para o módulo de deformação do concreto, aos 150 dias, em função do volume de agregado.....	70
Figura 3. 20 - Módulo de elasticidade em função do aumento do teor de agregados (m) dos concretos aos 28 dias	71
Figura 3. 21- Influência da mineralogia e tamanho do agregado no módulo de elasticidade ..	72
Figura 3. 22- Módulo de elasticidade do concreto para diferentes dimensões máximas de agregado.....	73
Figura 3. 23 - Dimensão máxima característica do agregado graúdo x módulo de elasticidade do concreto	74
Figura 3. 24 - Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto.....	75
Figura 3. 25 - Forma das partículas e o índice de vazios.....	76
Figura 3. 26 - Forma de agregados graúdos de origem basáltica (a) com britadores tipo cônico (b) proveniente de VSI	76
Figura 3. 27 - E_c do concreto com agregados reciclados britados (a) e arredondados (b)	77
Figura 3. 28- Influência da condição de umidade do corpo de prova sobre o módulo de elasticidade do concreto.....	79
Figura 3. 29- Variação da tensão x deformação com a velocidade de carga.....	80
Figura 3. 30- (a) estudo da distribuição dos instrumentos de medição das deformações no corpo-de-prova. (b) deformação medida para 4 níveis de sollicitação	81
Figura 3. 31- (a) distribuição dos instrumentos de medição das deformações no corpo-de-prova; (b) deformação medida para 4 níveis de sollicitação.....	83
Figura 3. 32- Instrumentos para medição da deformação: (a) dispositivos compressômetros; (b) compressômetro-expansômetro; (c) relógio comparador; (d) compressômetro com 2 relógios comparadores; (e) compressômetro com 1 relógio comparador	85
Figura 3. 33- Equipamentos para medir a deformação: (a) LVDT; (b) compressômetro com LVDT	86
Figura 3. 34- Equipamentos para medição da deformação: (a) strain gages de colagem superficial; (b) transdutores laminados de imersão; (c) transdutores cilíndricos de imersão...	86
Figura 3. 35- Instrumentos para medição da deformação: (a) laser; (b) microfilmagem sensorial programada	87
Figura 3. 36 - Efeito do dispositivo de medição x módulo de elasticidade do concreto	88
Figura 3. 37 - Módulo de elasticidade dos concretos estudados por tipo de equipamento de medição.....	89
Figura 4. 1- Fluxograma dos procedimentos do estudo	91
Figura 4. 2- Fluxograma das variáveis selecionadas para o estudo.....	92
Figura 4. 3 - Curva granulométrica do cimento	95
Figura 4. 4 - Agregados utilizados	96
Figura 4. 5 - Ensaio de módulo de elasticidade da rocha	97
Figura 4. 6 - Curvas granulométricas: agregado miúdo	99

Figura 4. 7 - Curvas granulométricas: agregados graúdos	99
Figura 4. 8 - Rochas utilizadas para as análises Petrográficas	101
Figura 4. 9 - Ensaio de Resistência à Compressão Axial	109
Figura 4. 10 - Equipamento utilizado para medir os deslocamentos das deformações – LVDT	110
Figura 5. 1 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de diabásio e basalto.....	120
Figura 5. 2 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de calcário e granito	120
Figura 5. 3 - Teor de pasta x resistência à compressão do concreto	121
Figura 5. 4 - Resistência à compressão x volume de pasta.....	122
Figura 5. 5 - Dependência da resistência à compressão do concreto do volume de pasta	122
Figura 5. 6 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de diabásio e basalto	123
Figura 5. 7 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de calcário e granito	124
Figura 5. 8 - Influência da relação água/cimento (a/c) na resistência do concreto.....	125
Figura 5. 9 - Resistência à compressão do concreto x relação a/c.....	125
Figura 5. 10 - Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto	126
Figura 5. 11 – Resistência à compressão do concreto com agregados reciclados britados (a) e agregados arredondados (b).....	127
Figura 5. 12 - Relação consumo de cimento x resistência à compressão x forma do agregado	127
Figura 5. 13 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto	128
Figura 5. 14 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de calcário e granito	129
Figura 5. 15 - Influência do E_c do agregado graúdo sobre a resistência do concreto.....	130
Figura 5. 16 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e a relação a/c: rochas de diabásio e basalto.....	131
Figura 5. 17 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto	132
Figura 5. 18 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto	133
Figura 5. 19 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto	134
Figura 5. 20 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto	135
Figura 5. 21 - Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto	136
Figura 5. 22 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto (a) índice de forma 1,58; (b) índice de forma 2,02; (c) índice de forma 2,50	137
Figura 5. 23 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c), forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto (a) E_c 79,2 GPa e (b) E_c 91,2 GPa.....	138
Figura 5. 24 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de diabásio e basalto.....	144
Figura 5. 25 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de calcário e granito	144
Figura 5. 26 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de diabásio e basalto	145
Figura 5. 27 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de calcário e granito	146

Figura 5. 28 - Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto	147
Figura 5. 29 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto	148
Figura 5. 30 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de calcário e granito	149
Figura 5. 31 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e a relação a/c: rochas de diabásio e basalto.....	151
Figura 5. 32 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e a relação a/c: rochas de calcário e granito	151
Figura 5. 33 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto	152
Figura 5. 34 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto	153
Figura 5. 35 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto.....	154
Figura 5. 36 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha: rochas de calcário e granito	154
Figura 5. 37 - Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto	156
Figura 5. 38 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto (a) índice de forma 1,58; (b) índice de forma 2,02 e (c) índice de forma 2,50	157
Figura 5. 39 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto (a) E_c 79,2 GPa e (b) E_c 91,2 GPa	158
Figura 5. 40 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha: rochas de calcário e granito (a) E_c 63,0 GPa e (b) E_c 65,8 GPa.....	159
Figura 5. 41 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto (a) E_c 79,2 GPa e (b) E_c 91,2 GPa	160
Figura 5. 42 - Valores observados x valores previstos – Módulo de Elasticidade do Concreto	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Estudo dos fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto	37
Tabela 2. 2 - Atualização das normas brasileiras para determinação do módulo de elasticidade	40
Tabela 2. 3 - Normativas internacionais para estimar o módulo de elasticidade e a deformação	41
Tabela 2. 4 - Predição do módulo de elasticidade proposto por diferentes autores	46
Tabela 3. 1- Módulo de elasticidade da pasta em vários períodos de hidratação.....	53
Tabela 3. 2 - Módulo de elasticidade das principais rochas utilizadas como agregados.....	61
Tabela 3. 3 - Propriedades típicas de rochas	62
Tabela 3. 4 - Propriedades de basaltos extraídos de diferentes localidades	63
Tabela 3. 5- Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade do concreto com agregado de basalto	66
Tabela 3. 6- Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade do concreto com agregado de granito	66
Tabela 3. 7 -Influência do tipo e da dimensão máxima do agregado no módulo de elasticidade do concreto	74
Tabela 3. 8 - Determinação do índice de forma	77
Tabela 4. 1- Caracterização química do cimento	94
Tabela 4. 2- Caracterização física e mecânica do cimento.....	94
Tabela 4. 3 - Local de extração das rochas, tipo de rocha, resistência à compressão e módulo de elasticidade	97
Tabela 4. 4- Composição granulométrica: agregado miúdo.....	98
Tabela 4. 5 - Composição granulométrica: agregados graúdos.....	98
Tabela 4. 6- Caracterização física: agregados miúdo e graúdos.....	100
Tabela 4. 7 - Resumo das Análises Petrográficas.....	102
Tabela 4. 8 - Dados técnicos do aditivo superplastificante Plastoflow 7025	103
Tabela 4. 9- Legenda dos traços	104
Tabela 4. 10 - Traços unitários com as interações entre as variáveis definidas para m=4,5 e volume de pasta 24,7%	105
Tabela 4. 11 - Traços unitários com as interações entre as variáveis definidas para m=6 e volume de pasta 19,8%	106
Tabela 4. 12 - Traços unitários com as interações entre as variáveis definidas para m=7,5 e volume de pasta 16,5%	107
Tabela 5. 1 - Resultados médios da Resistência à Compressão do concreto com as rochas de diabásio e basalto.....	116
Tabela 5. 2 - Resultados médios da Resistência à Compressão do concreto com as rochas de calcário e granito	117
Tabela 5. 3 - ANOVA: resistência à compressão do concreto - rochas de diabásio e basalto	118
Tabela 5. 4 - ANOVA: resistência à compressão do concreto - rochas de calcário e granito	119
Tabela 5. 5 - Resultados médios do Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de diabásio e basalto.....	140
Tabela 5. 6 - Resultados médios do Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de calcário e granito	141
Tabela 5. 7 - ANOVA: módulo de elasticidade do concreto - rochas de diabásio e basalto..	142
Tabela 5. 8 - ANOVA: módulo de elasticidade do concreto - rochas de calcário e granito ..	143

Tabela 5. 9 - ANOVA da regressão – Módulo de Elasticidade do concreto.....	162
Tabela 5. 10 - Validação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto.....	163
Tabela 5. 11 - Comparação da validação do modelo proposto para a previsão do módulo de elasticidade do concreto com os demais modelos conhecidos	164
Tabela 5. 12 - Variáveis dos melhores modelos considerados para a previsão do módulo de elasticidade do concreto.....	166
Tabela 5. 13 - Validação do modelo proposto por esta pesquisa com outros dados	167

LISTA DE ABREVIATURAS

- a/c – Relação água/cimento
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI - American Concrete Institute ASTM - American Society for Testing and Materials
- ANOVA - Análise de Variância
- ASTM - American Society for Testing and Materials ATD – Análise térmica diferencial
- C₂S – Silicato dicálcico
- C₃S – Silicato tricálcico
- CAD – Concreto de Alto Desempenho
- CEB-FIB - International Federation for Structural Concrete
- CPV-ARI - Cimento Portland de ALta Resistência inicial
- C-S-H – Denominação genérica para silicato de cálcio hidratado
- CV – Coeficiente de Variação
- D.P – Desvio-padrão
- E_{ci} – Módulo de elasticidade do concreto ou módulo de deformação tangente inicial
- E_d – Módulo de elasticidade dinâmico
- E_{cs} – Módulo de deformação secante do concreto
- f_c – Resistência à compressão
- f_{ck} – Resistência característica à compressão
- f_{cm} - Resistência à compressão média
- GPa – Giga Pascal
- H (%) – Teor de água sobre materiais secos
- KHz - QUILO-HERTZ
- LACER - Laboratório de Materiais Cerâmicos
- LMCC – Laboratório de Materiais de Construção Civil
- LVDT - Linear Variable Differential Transformer
- MPa- Mega Pascal
- NBR - Norma brasileira
- UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
- VSI - impactador de eixo vertical
- α (%) – Teor de argamassa anidro, em massa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS	28
1.1.1	Objetivo geral	28
1.1.2	Objetivos específicos	28
1.2	ORIGINALIDADE DO TEMA.....	28
1.3	ORIGINALIDADE DO TEXTO.....	29
2	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	31
2.1	TENSÃO X DEFORMAÇÃO	33
2.2	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.....	35
2.3	MODELOS ESTATÍSTICOS PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	36
2.3.1	Equações normativas.....	40
2.3.2	Modelos propostos por pesquisadores.....	46
3	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	51
3.1	ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO	52
3.1.1	Matriz da pasta de cimento	52
3.1.2	Zona de transição	58
3.1.3	Agregado	60
3.1.3.1	Propriedades do agregado graúdo.....	60
3.1.3.2	Teor de agregado graúdo	68
3.1.3.3	Dimensão máxima do agregado.....	71
3.1.3.4	Índice de forma do agregado graúdo	75
3.2	PARÂMETROS DE ENSAIO	78
3.2.1	Instrumentos para medição das deformações.....	84
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	90
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO.....	93
4.1.1	Cimento	93
4.1.2	Agregados	95
4.1.3	Água.....	103
4.1.4	Aditivo	103
4.2	PARÂMETROS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS	103
4.3	MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA.....	108

4.4	ENSAIOS REALIZADOS COM O CONCRETO	109
4.4.1	Resistência à compressão axial	109
4.4.2	Módulo de deformação do concreto	110
4.5	ESTUDO DO MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.....	111
4.6	APRESENTAÇÃO, TRATAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	114
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
5.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO.....	115
5.1.1	Efeito isolado da variável volume de pasta	119
5.1.2	Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c)	123
5.1.3	Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo	126
5.1.4	Efeito isolado da variável E_c da rocha	128
5.1.5	Interações	130
5.1.5.1	Efeito da interação das variáveis volume de pasta e relação água/cimento (a/c)	130
5.1.5.2	Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo	131
5.1.5.3	Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo.	132
5.1.5.4	Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha	133
5.1.5.5	Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha.....	134
5.1.5.6	Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha.....	135
5.1.5.7	Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo	136
5.1.5.8	Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c), forma do agregado graúdo e E_c da rocha	138
5.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO	139
5.2.1	Efeito isolado da variável volume de pasta	143
5.2.2	Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c)	145
5.2.3	Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo	147
5.2.4	Efeito isolado da variável E_c da rocha	148
5.2.5	Interações	150
5.2.5.1	Efeito da interação das variáveis volume de pasta e relação água/cimento (a/c)	150
5.2.5.2	Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo	152
5.2.5.3	Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo.	152

5.2.5.4	Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c a rocha	154
5.2.5.5	Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c a rocha.....	155
5.2.5.6	Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo	156
5.2.5.7	Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha.....	158
5.2.5.8	Efeito da interação das variáveis volume de pasta, forma do agregado graúdo e E_c da rocha.....	160
5.3	MODELO PARA A PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO.....	161
5.3.1	Comparação entre o modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto com demais normas e modelos conhecidos na literatura	164
5.3.1.1	Validação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto com outros modelos da bibliografia.....	169
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	168
6.1	CONCLUSÕES	168
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	170
7	REFERÊNCIAS	171
	ANEXO A.....	188
	APÊNDICE A	195
	APÊNDICE B.....	204

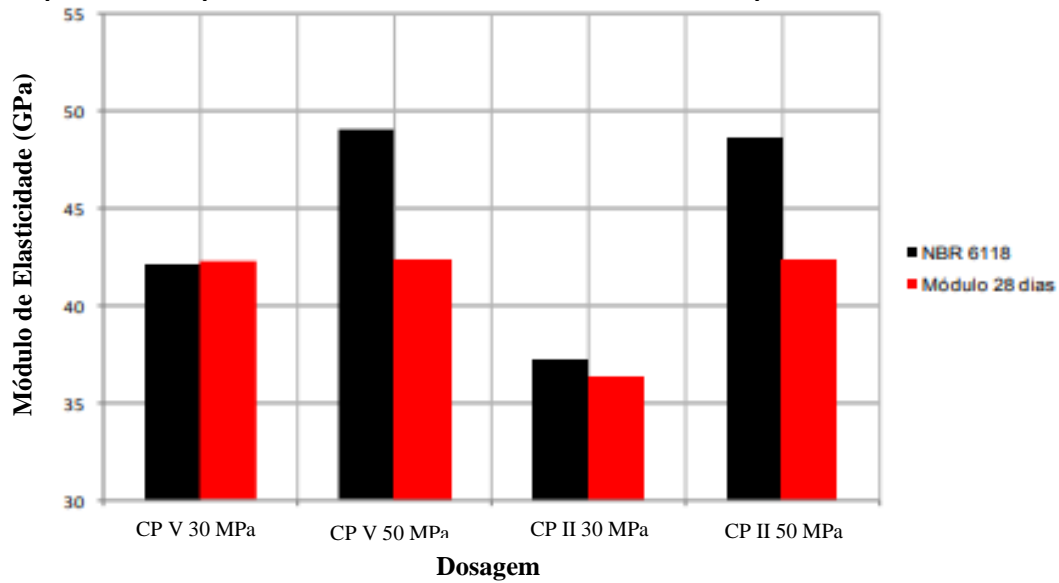
1 INTRODUÇÃO

Em nível nacional e internacional, as estruturas de concreto armado são muito utilizadas, fazendo parte do padrão da construção habitacional e de infraestrutura. Um dos motivos da ampla utilização deste material de construção diz respeito a grande capacidade de resistência e facilidade de execução do concreto, sendo o mesmo um dos materiais mais consumidos pela construção civil em todo o Planeta.

O processo de racionalização e industrialização das construções impulsionou profundas alterações nas técnicas de construir edificações no Brasil, estimulando os profissionais a desenvolver projetos cada vez mais arrojados, movidos pelas novas tendências arquitetônicas, com edifícios altos, redução da espessura da laje e número de pilares, entre outras modificações. Dessa forma, coube aos engenheiros projetistas adotar sistemas mais leves e buscar soluções estruturais seguras e econômicas, entre elas, o aumento da resistência do concreto. De acordo com Massucato *et al.* (2003), com a redução do uso de concretos de baixa resistência, na ordem de 20 a 30 MPa, as preocupações com o módulo de elasticidade aumentaram, pois quando se tinha concretos com baixa resistência as equações previstas pelas normas, relacionando $f_c \times E_c$, até então se mostravam satisfatórias.

O estudo do módulo de elasticidade do concreto com diferentes resistências à compressão realizado por Santos e Godinho (2018), utilizando dois tipos de cimento (CP V e CP II) para duas resistências à compressão axial (30 e 50 MPa), ensaiados aos 28 dias de idade do concreto, comprovaram que para as resistências à compressão de 30 MPa, para ambos os tipos de cimento, os resultados estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014) apresentaram precisão, porém quando se aumenta essa resistência para 50 MPa, verifica-se que os resultados obtidos pela mesma norma apresentaram-se superestimados, conforme a Figura 1.1.

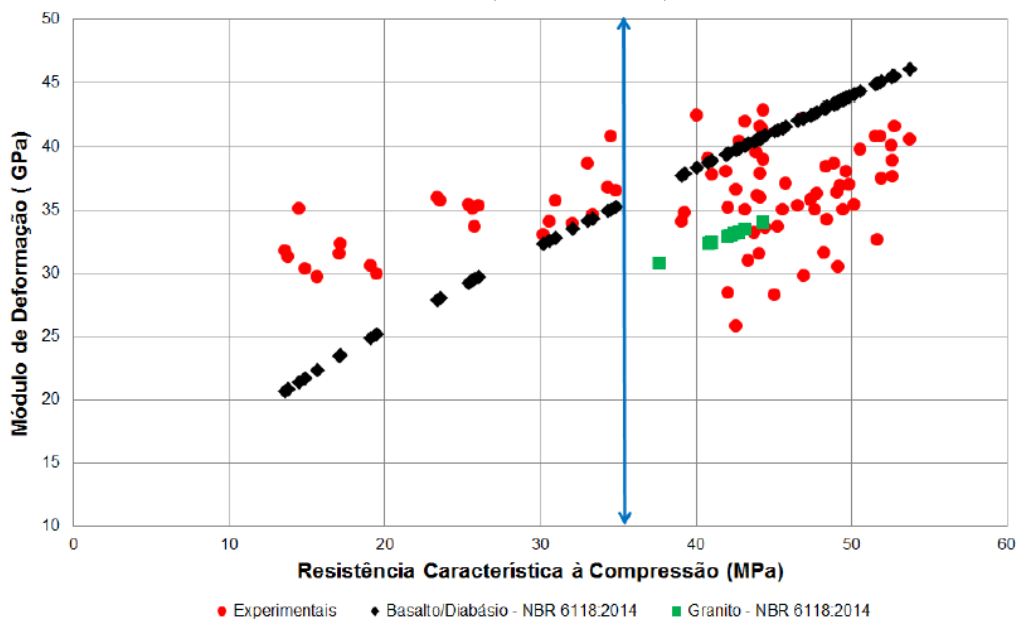
Figura 1. 1 - Módulo de elasticidade estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e valores experimentais para diferentes classes de resistência à compressão axial do concreto



Fonte: Santos e Godinho, 2018

Girardi (2018) também apresenta um estudo comparativo dos resultados experimentais para o módulo de elasticidade do concreto e compara com os resultados estimados pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014), em função da resistência à compressão aos 28 dias de idade, Figura 1.2.

Figura 1. 2- Comparação entre módulo de elasticidade experimental e valores estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014)



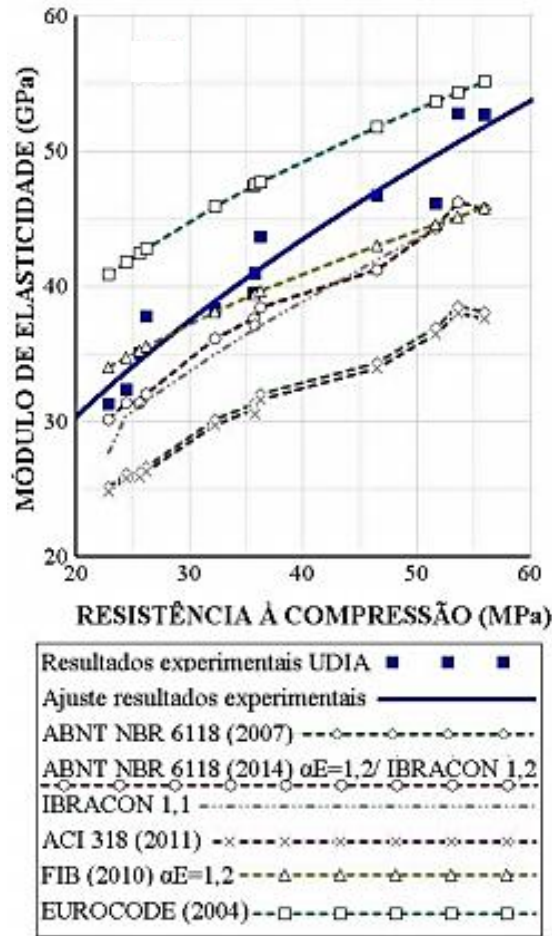
Fonte: Girardi, 2018

Conforme a Figura 1.2, o alinhamento em azul na vertical separa os resultados em que os valores experimentais para o módulo se apresentam superiores aos estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), verifica-se este comportamento para resistências à compressão até aproximadamente 35 MPa, e acima desta resistência os valores se invertem e a NBR 6118 (ABNT, 2014) passa a superestimar os valores de módulo de deformação, tanto para agregados de basalto/diabásio como para granito. Ainda é importante frisar que para essa situação a equação da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) estima valores para o módulo crescentes com os valores da resistência à compressão, comportamento este que não é verificado com os resultados experimentais. Pode-se concluir que existem outros fatores que interferem no módulo de deformação do concreto além da resistência à compressão, e que a equação da NBR 6118 (ABNT, 2014) foi ajustada para valores de até 30 – 35 MPa de resistência e a extrapolação não funciona.

Vários modelos e equações foram propostos na literatura para o módulo de elasticidade de diferentes classes de resistência de concreto (CEB-FIB 1990; ACI Committee 363 2010; ACI Committee 318 2014; MA *et al.*, 2004; KOLLMORGEN 2004). Porém, os materiais e proporções dos concretos estruturais que estão sendo produzidos nos últimos anos diferem muito dos produzidos há duas décadas atrás, sendo assim, com construções mais esbeltas, houve a redução da dimensão máxima dos agregados, dentre outros fatores, que afetaram significativamente o módulo de elasticidade do concreto. Mediante esses acontecimentos se percebe grande necessidade de revisão das normas para a execução das estruturas, bem como, estudos de pesquisa aprofundados que auxiliem essa questão.

Considerando este contexto, Santos *et al.* (2017) realizaram um estudo comparativo entre os valores experimentais do módulo de elasticidade do concreto e os estimados pelas diferentes normas. A Figura 1.3 apresenta a comparação dos resultados experimentais de Eci com os valores obtidos pelas equações propostas pelas normas, utilizando agregados graúdos de basalto, extraídos da jazida da cidade de Uberlândia (BA-UDIA).

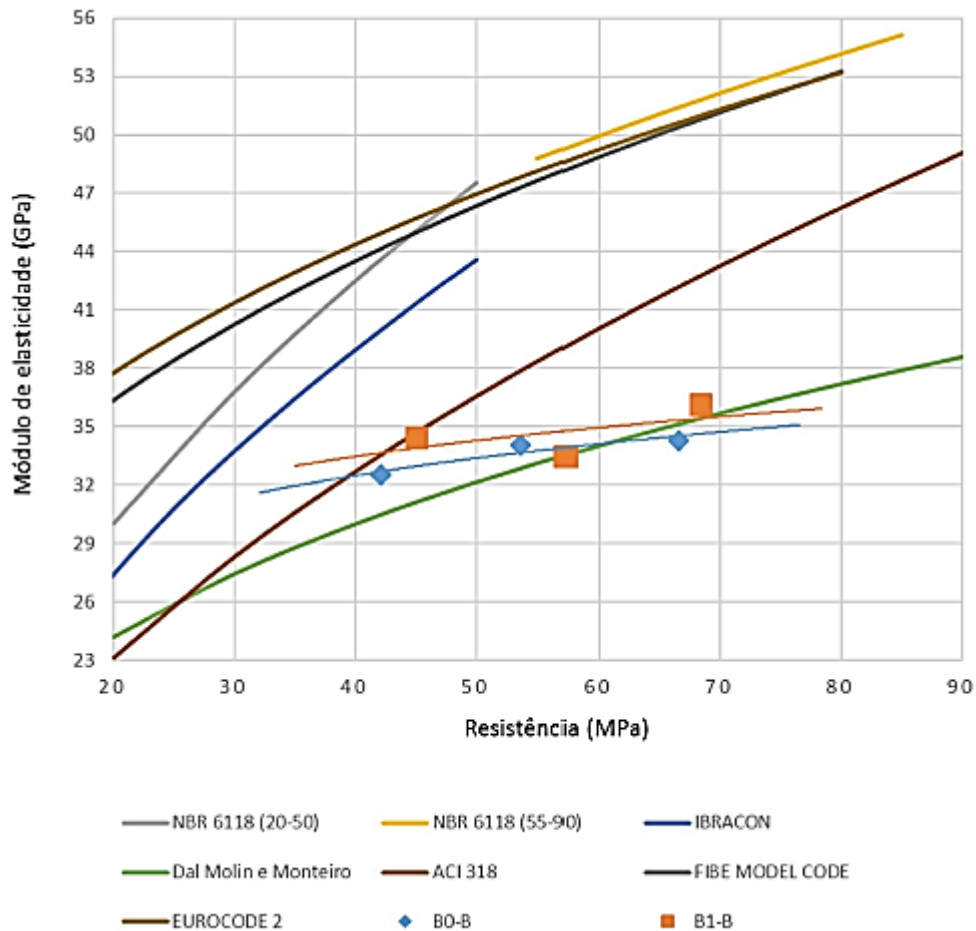
Figura 1.3 - Comparação dos resultados experimentais de E_{ci} com os valores obtidos pelas equações propostas pelas normas



Fonte: Adaptado de Santos et. al., 2017

Na Figura 1.3 se percebe a discrepância que há entre os valores experimentais de E_{ci} e os estimados pelas diferentes normas. Weizenmann (2017) também correlacionou os valores experimentais e os estimados do módulo de elasticidade do concreto tanto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) como demais modelos da literatura (Figura 1.4), e concluiu que os resultados estimados pela norma brasileira superestimam o módulo em 19 a 33%, sendo que essa diferença tende a aumentar com o aumento da resistência do concreto.

Figura 1. 4 - Correlações entre f_c e E_{ci} com utilização da brita basalto x modelos da literatura



Fonte: Weizenmann, 2017.

Vale frisar que essas diferenças ocasionam sérios problemas em obras, pois muitas vezes ocorre a superestimação do módulo, resultando em problemas na estrutura devido à deformação excessiva. Silva e Filho (2006) listam várias consequências resultantes da deformação excessiva, como: alvenarias não estruturais podem receber carregamento e apresentar fissuras ou esmagamentos; comprometimento de funcionamento adequado de janelas e portas; instalação de processos de fissuração, comprometendo a estética e a durabilidade da edificação; necessidade de executar regularização de lajes, entre outras. Oliveira e Cardoso (2018) enfatizam que os problemas resultantes das deformações excessivas interferem diretamente na durabilidade da edificação, gerando altos custos de reparação e correção de manifestações patológicas, necessitando de mão de obra especializada. Sendo assim, reafirma-se a necessidade de buscar modelos de previsão que se aproximem mais dos resultados experimentais e que minimizem esses problemas que estão ocorrendo com mais frequência, prejudicando as características da estrutura.

Prever com maior precisão o módulo de elasticidade é fundamental para a execução do projeto, pois o seu resultado auxilia no cálculo de deformações, no conhecimento das tensões entre o concreto e o aço das estruturas, além de contribuir para a determinação das tensões resultantes de retração e recalque (SOUZA *et al.*, 2015).

É necessário que se trabalhe com o projeto estrutural mais próximo possível do comportamento real da estrutura, mas para isso precisa-se conhecer profundamente as características do concreto, como a deformação, a fluência e a retração. Vale frisar que, aumentar a resistência à compressão do concreto não garante que o mesmo seja pouco deformável, ou que, o ganho de resistência será proporcional à evolução do módulo de elasticidade. Segundo Ali, Farid e Al-Janabi (1990), é importante conhecer a relação existente entre a resistência e a deformação do concreto.

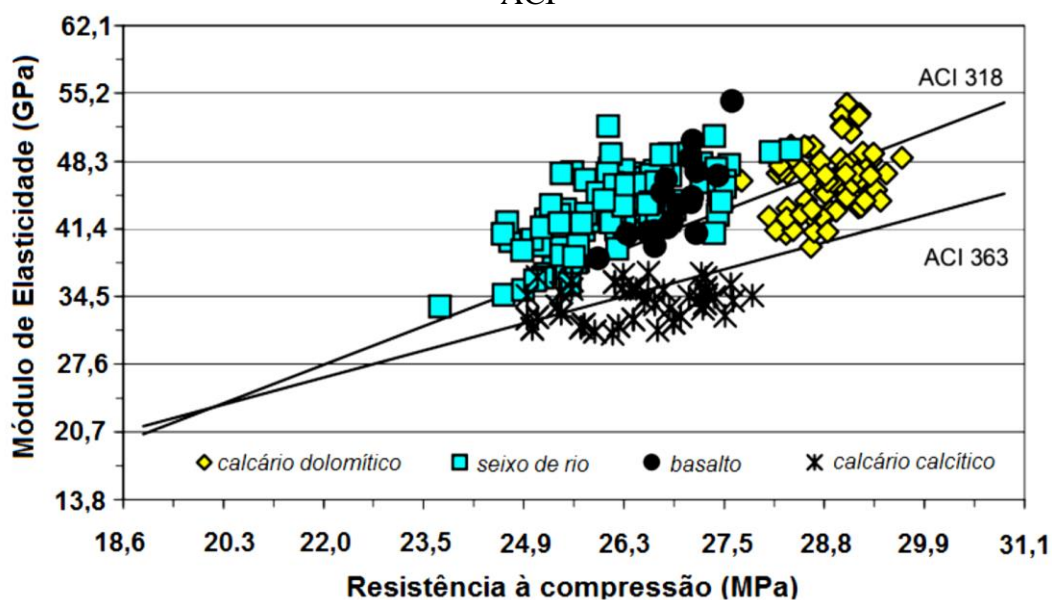
Com o propósito de apresentar classes de resistência maiores a NBR 6118 (ABNT, 2014), que foi revisada no ano de 2014, apresentava na versão anterior até 50 MPa e atualmente é até 90 MPa. Em relação ao aspecto técnico, mesmo com a evolução da NBR 6118 (ABNT, 2014), ainda é pertinente que se faça uma avaliação das equações para estimar o módulo de elasticidade, com o intuito de buscar a dispersão dos valores obtidos por meio experimental, já que a mesma considera como dados de entrada apenas aspectos como resistência à compressão do concreto e tipo de agregado graúdo, não considerando demais parâmetros e nem mesmo a interação entre os fatores que afetam o resultado final do módulo de elasticidade. De acordo com Melo Neto e Helene (2002), os valores de módulos de deformação, em concretos com a mesma relação a/c, podem variar muito de acordo com os parâmetros de dosagem, principalmente com o teor de agregado, representando um risco para os modelos de previsão que tomam como base somente a resistência à compressão. Aitcın e Mehta (1990) e Baalbaki *et al.* (1991) já demonstraram há algum tempo atrás que o módulo de deformação do concreto é influenciado pelas propriedades elásticas individuais, pelo fracionamento volumétrico e pela interação das suas fases constituintes.

Estudos realizados por diversos pesquisadores como Jurowski e Grzeszczyk (2015); Tibbetts *et al.* (2018); Hussain *et al.* (2018); Kocab (2017); Zhu *et al.* (2018); Padhi *et al.* (2018); Piasta *et al.* (2017); Beushausen e Dittmer (2015); entre outros estudos, também apontam que são muitos os fatores que influenciam no valor do módulo de elasticidade do concreto, dentre eles: tipos, teor volumétrico, tamanho e dimensões máximas de agregados, relação água/cimento, temperatura de cura, diferentes idades de ensaio e tipos de cura. Nesses estudos os pesquisadores reafirmam a necessidade de adaptação das normas para prever o

módulo, já que não são apenas um ou dois fatores que interferem em seu resultado, como as mesmas preveem.

Ao comparar resultados experimentais de módulo de elasticidade e resistência à compressão do concreto com diferentes agregados graúdos, Myers (2008) verificou as mesmas disparidades que Kliszczewcz e Ajdukiewicz (2002), em que concluíram que para diferentes rochas e mesma resistência à compressão do concreto, o módulo de elasticidade apresenta variação (Figura 1.5). Vale frisar que os valores para comparação foram estimados pelas equações da ACI 318 e ACI 363.

Figura 1. 5 - Comparação do módulo de elasticidade experimental e teórico, de acordo com o ACI



Portanto, dentro deste contexto, pode-se concluir que são muitas as variáveis que interferem no módulo de elasticidade, e que pela bibliografia consultada, percebe-se que essas variáveis têm sido estudadas de maneira isolada, ou com poucas interações entre elas, resultando em modelos de previsão de módulo que não apresentam resultados precisos quando comparados com os valores reais obtidos na execução da estrutura. Dessa forma, a grande preocupação dos engenheiros projetistas está na deformação excessiva da estrutura, pois o módulo de elasticidade considerado no dimensionamento, muitas vezes, não é alcançado na obra.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Propor um modelo matemático que contribua para a previsão teórica do módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland com agregados naturais a partir da interação das variáveis físicas que o influenciam de forma significativa.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) verificar a influência das variáveis (volume de pasta, relação água/cimento (a/c), módulo de elasticidade e forma do agregado graúdo) e suas interações sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland quando se utilizam rochas de Diabásio e Basalto;
- b) verificar a influência das variáveis (volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e módulo de elasticidade do agregado graúdo) e suas interações sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland quando se utilizam rochas de Calcário e Granito;
- c) validar o modelo de previsão para o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland proposto pelo presente trabalho e comparar com alguns modelos propostos por normas e autores citados na literatura;
- d) identificar quais dos modelos validados se adequam melhor aos resultados experimentais.

1.2 ORIGINALIDADE DO TEMA

Muitas pesquisas têm sido realizadas para tentar identificar os diferentes fatores que alteram o módulo de elasticidade (JUROWSKI e GRZESZCZYK, 2015; TIBBETTS *et al.*, 2018; HUSSAIN *et al.*, 2018; KOCAB, 2017; ZHU *et al.*, 2018; LIU *et al.*, 2014; PADHI *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2016; GIRARDI, 2018). No entanto, a maioria desses estudos investiga de maneira isolada a influência das variáveis no valor do módulo,

alguns estudam a interferência do tipo, dimensão máxima e volume de agregado, outros estudam o tipo de cura, temperatura, idades de ensaio, adições minerais, temperatura, entre outros fatores, que podem vir a influenciar no resultado do módulo de elasticidade. Ainda, existem algumas pesquisas que estudam poucas interações entre as variáveis que influenciam no módulo do concreto, ou estudam a variação de uma das variáveis, mas acabam variando as demais, mascarando assim os resultados.

No entanto, não foram encontrados na bibliografia consultada estudos que analisassem a interação das diferentes variáveis que interferem no valor do módulo de elasticidade. Ao constatar essa realidade, a presente pesquisa buscou estudar a interação entre as principais variáveis, como: relação água/cimento (resistência à compressão), volume de pasta, módulo de elasticidade e forma do agregado graúdo. A partir dessas variáveis buscou-se obter uma equação para a previsão do módulo de elasticidade do concreto, já que a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) considera como dados de entrada apenas a resistência à compressão axial e o tipo de agregado graúdo. Dessa forma, a partir de dados mais precisos dos materiais constituintes do concreto e seus proporcionamentos, será possível a adoção de um módulo de elasticidade mais próximo da realidade local, minimizando eventuais preocupações dos engenheiros projetistas, uma vez que o módulo previsto em projeto muitas vezes não é o obtido na execução da obra com os materiais disponíveis localmente.

1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema, bem como a importância e justificativa em estudar o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland. Ainda, apresenta o objetivo principal e os objetivos secundários da pesquisa, e, em seguida a originalidade do tema.

No capítulo 2 reforça-se a importância da determinação do módulo de elasticidade, em que se apresenta a relação entre tensão x deformação, e, os ensaios experimentais para a determinação do módulo. Ainda, o capítulo apresenta um levantamento das diferentes pesquisas realizadas sobre as variáveis que influenciam o módulo de elasticidade do concreto, permitindo a identificação das principais, bem como as equações normativas e demais modelos para a previsão do módulo. Assim, pode-se verificar a discrepância entre o E_{ci} obtido experimentalmente e o estimado.

Os parâmetros que influenciam o módulo de elasticidade do concreto estão apresentados no capítulo 3, sendo distribuídos nos diferentes itens: matriz da pasta de cimento; zona de transição; agregado; parâmetros de ensaio, os quais serviram de subsídio para a identificação

das principais variáveis de dosagem que interferem no valor do módulo de deformação.

Após a revisão bibliográfica, o capítulo 4 relata o programa experimental do trabalho, em que são apresentadas as variáveis independentes que foram selecionadas para o estudo do módulo de elasticidade do concreto (relação água/cimento, resistência à compressão, volume de pasta, módulo de elasticidade e forma do agregado graúdo); também são apresentadas as características físicas, químicas e mecânicas dos materiais utilizados. São explanados os parâmetros de dosagem, os procedimentos de moldagem e desmoldagem dos corpos de prova, bem como, os ensaios realizados com o concreto, e, os procedimentos adotados para formular o modelo para a previsão do módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland, a partir da identificação das variáveis e interações que influenciaram significativamente no módulo.

No capítulo 5 estão apresentados os resultados obtidos em relação à resistência à compressão axial e módulo de elasticidade do concreto. A partir desses resultados foram realizadas discussões e análises estatísticas, que permitiram propor o modelo de previsão para o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland.

O capítulo 6 apresenta as considerações finais a partir do estudo realizado.

E no capítulo 7 encontra-se a lista de referências que auxiliaram o desenvolvimento do trabalho.

2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

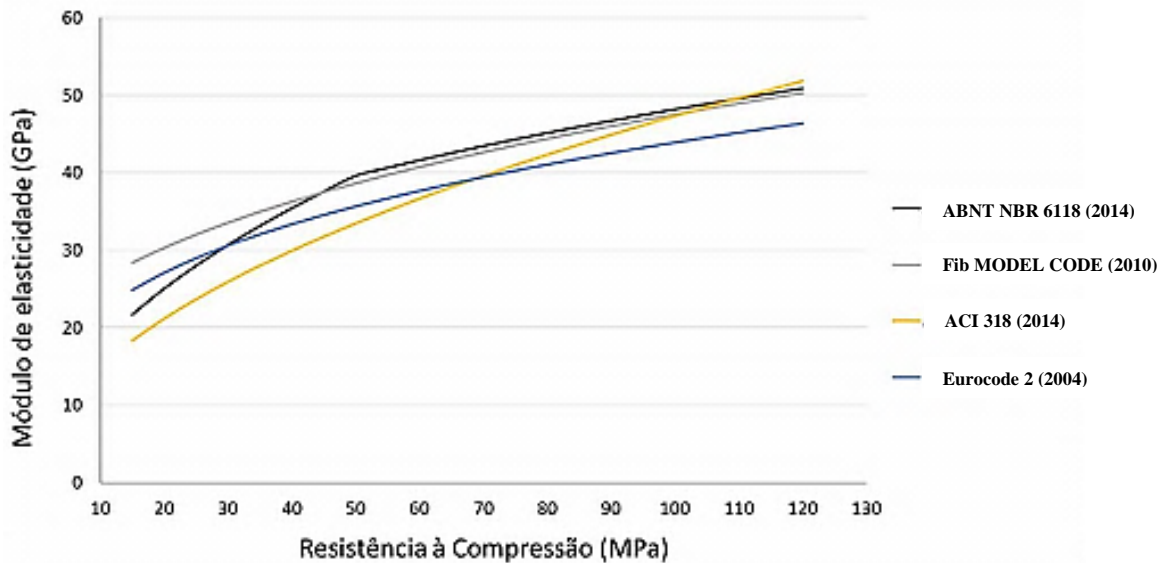
O principal fundamento para o dimensionamento de uma estrutura de concreto armado são as propriedades mecânicas do concreto. No entanto, para que os valores utilizados no projeto estrutural sejam alcançados na execução da obra, o conhecimento do comportamento mecânico dos materiais é imprescindível, bem como o conhecimento das propriedades de deformação dos mesmos, sendo necessário não apenas conhecer a resistência à compressão do concreto, mas também o módulo de elasticidade, a retração, a fluência, além de outros parâmetros que expressem as condições dos estados limites de serviço.

A NBR 8522 (ABNT, 2017) apresenta as diretrizes para a determinação do módulo de elasticidade, ou também, chamado de módulo de deformação tangente inicial (E_{ci}) e para a determinação do módulo de deformação secante (E_{cs}). O E_{ci} é o módulo tangente à origem, com valor de deformação secante obtido entre 30% de f_c e 0,5 MPa, já o E_{cs} é o coeficiente angular da secante ao diagrama tensão-deformação específica, considerando o carregamento de 0,5 MPa utilizado no ensaio. Para Barbosa (2011), o módulo de elasticidade tem a função de auxiliar na avaliação do comportamento geral da estrutura e na determinação das perdas de protensão, e o módulo de deformação secante é utilizado para fazer a simulação do primeiro carregamento e a verificação das deformações máximas.

A resistência à compressão é, na maior parte das normas, utilizada para prever o módulo de elasticidade do concreto, no entanto, essa estimativa deve ser usada com muito cuidado e cautela, pois a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são propriedades mecânicas distintas e influenciadas de formas diferentes pelas variáveis do concreto (NEVILLE, 2011). Deve-se atentar que o valor do módulo depende de muitos outros fatores além da resistência à compressão, como a porcentagem do volume de agregado, densidade, tipo de agregado, volume de pasta, entre outros.

Contudo, não há um consenso sobre qual o melhor modelo de previsão do módulo de elasticidade, visto que há diversos questionamentos a respeito das normas nacionais e internacionais que aplicam este tipo de correlação (BORIN *et. al*, 2012). Na Figura 2.1 pode-se observar a discrepância que ocorre nos resultados de módulo de elasticidade estimado pelos principais modelos de previsão a partir da resistência à compressão.

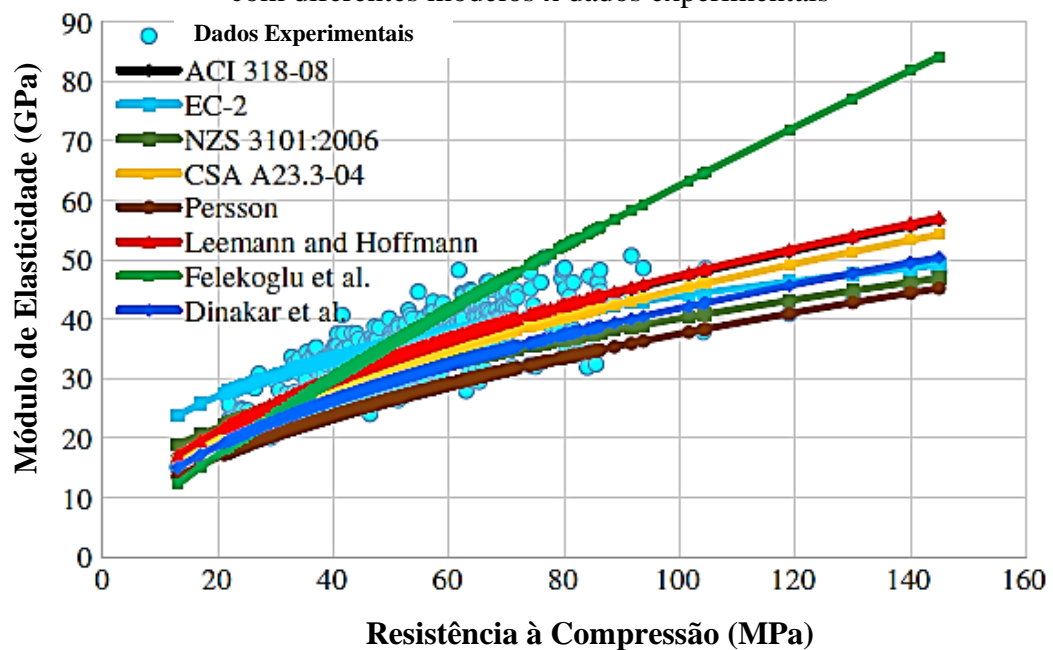
Figura 2. 1 - Previsão do módulo de elasticidade do concreto baseado na resistência à compressão, de acordo com as normas nacionais e internacionais



Fonte: Adaptado de Otani e Pereira, 2017

Com o intuito de comparar o módulo de elasticidade obtido de forma experimental e os valores estimados por diferentes normas e modelos proposto pela literatura, Golafshani e Ashour (2016) formularam um gráfico que está representado na Figura 2.2.

Figura 2. 2 - Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto com diferentes modelos x dados experimentais



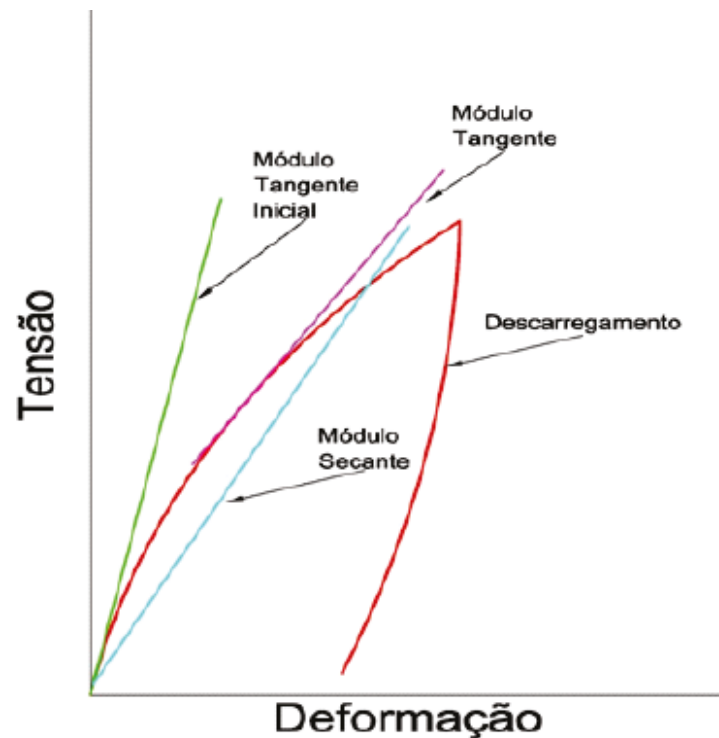
Fonte: Adaptado de Golafshani e Ashour, 2016.

A discrepância entre os resultados de módulo de elasticidade do concreto obtidos experimentalmente e previstos por equações explica o motivo de cientistas e engenheiros da construção terem aumentado o interesse pelo estudo do módulo de elasticidade nos últimos anos (YILDIRIM *et al.*, 2011; ZHOU *et al.* 2015; ZHANG *et al.*, 2016). Dessa forma, como o módulo de elasticidade geralmente é especificado na fase de projeto, correlacionado com a resistência à compressão, usualmente fornecedores de concreto vem sendo obrigados a produzir um material com resistência à compressão maior do que a especificada, muitas vezes para compensar a incerteza devido, à estimativa do módulo de elasticidade do concreto, para não correrem o risco de terem o material rejeitado (BORIN *et. al.*, 2012).

2.1 TENSÃO X DEFORMAÇÃO

O módulo de deformação elástico se define por meio de uma curva típica de tensão x deformação de um concreto submetido a esforços de compressão e tração, com carregamentos e descarregamentos sucessivos, como mostra a Figura 2.3. Desta forma, a denominação “módulo de deformação elástico” só pode ser usada na fase inicial retilínea da curva de tensão x deformação, ou então, quando não existir parte retilínea, pela tangente à curva na origem. Nesse caso, denomina-se módulo de elasticidade tangente inicial (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Como a NBR 8522 (ABNT, 2017) considera a determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir de 30% da resistência à compressão média, infere-se que até esse nível de carregamento o comportamento é linear, servindo, assim, para avaliar a elasticidade global do projeto.

Figura 2. 3 - Curva tensão deformação de concretos

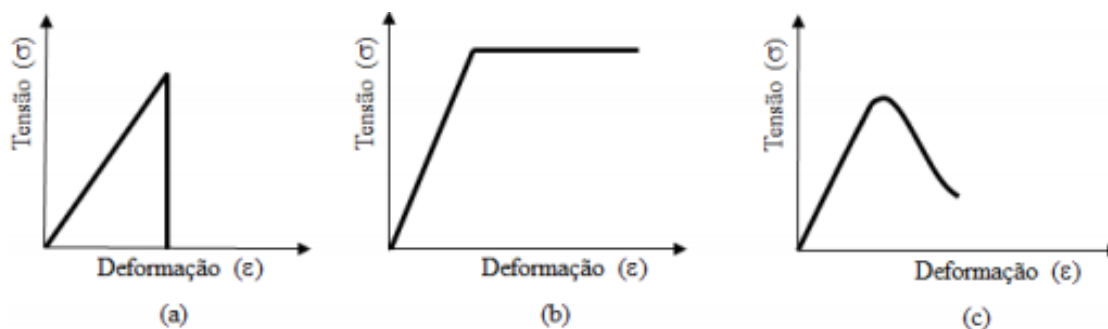


Fonte: Mehta e Monteiro, 2014

Conforme Mehta e Monteiro (2014), por apresentar comportamento não-linear, a curva de tensão x deformação do concreto apresenta dificuldades para determinar exatamente um único valor de módulo de elasticidade estático.

O concreto apresenta alta resistência à compressão, mesmo assim, detém de algumas limitações, como a baixa resistência à tração e ductilidade, podendo ser considerado um material quase frágil. Li (2011) classifica o modo de falha dos materiais em três categorias, como mostra a Figura 2.4, apresentando as curvas de tensão x deformação dos materiais classificados como: material frágil (a) apresentando uma fratura abrupta, não tendo capacidade de deformação; quase frágil (b) caracterizado por apresentar limitada capacidade de absorver energia antes da ruptura; e dúctil (c) possuindo deformação plástica, e permitindo a lenta propagação das fissuras impostas ao material.

Figura 2. 4 - Curvas de tensão x deformação dos materiais considerados como: (a) frágil; (b) quase frágil; (c) dúctil



Fonte: Li, 2011

No entanto, a NBR 8522 (ABNT, 2017) determina o módulo de elasticidade do concreto como sendo 30% da resistência à compressão média, inferindo este nível como o limite para que se tenha o comportamento linear. E ainda supõe o traçado do diagrama tensão x deformação em um carregamento progressivo entre 20 e 80% da resistência à compressão média, estabelecendo, assim, que o módulo de deformação corresponde à tensão de 30%.

2.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado. Sendo assim, ele é dado pela declividade da curva de tensão-deformação sob um carregamento uniaxial, como estabelece as diretrizes da NBR 8522 (ABNT, 2017). A mesma norma estabelece três métodos para a determinação dos módulos de deformação longitudinal, que resumidamente são:

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido como módulo de elasticidade tangente inicial. Do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e 0,3 f_c e ao módulo de elasticidade secante a 0,3 f_c . Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_{ci} , geralmente expresso em GPa.
- Módulo de deformação, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c . Em geral trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5 MPa e 0,4 f_c , que é equivalente ao módulo de elasticidade secante a 0,4 f_c , pois esta é geralmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Convenciona-se indicar este módulo de deformação por E_c , geralmente expresso em GPa.

- Módulo de deformação, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado.

Vale frisar que mesmo seguindo a padronização, procedimentos e modernização de equipamentos para a realização dos ensaios, podem ocorrer prejuízos irreversíveis aos resultados obtidos, devido a descuidos na preparação dos corpos de prova e execução desses ensaios, visto que as variações que podem ocorrer nos resultados são muitas. No entanto, Bilesky (2016) afirma que se forem consideradas todas as variáveis e dificuldades no ensaio do módulo, se os procedimentos forem de acordo com a norma, não deveriam ocorrer erros graves, os quais influenciam no valor da incerteza ou dos desvios do ensaio.

Um dos fatores que pode ocasionar variações nos resultados é a possibilidade de escolha na condução dos ensaios estabelecida pela NBR 8522 (ABNT, 2017), entre elas a dimensão do corpo de prova, tipo de adensamento, modo de preparação das bases do corpo de prova, tipo de equipamento para medir os deslocamentos, entre outros. Além disso, mesmo que fosse possível controlar todas as variáveis de ensaio, ainda existe a influência do operador do ensaio.

Conforme Montija (2017), as variabilidades dentro do ensaio, aferidas em programas interlaboratoriais nacionais, podem promover desvios padrões da ordem de 3,5 GPa. Dados destas mesmas comparações, de acordo com os resultados apresentados por Bittencourt et. al. (2014), mostram que estes desvios são de 5,8 GPa a 6,3 GPa, o que significa uma variabilidade expressa pelo coeficiente de variação da ordem de 10% a 15%.

Essa variabilidade dos resultados, infelizmente, tem levado a discussões desnecessárias entre fornecedores, construtores e projetistas.

2.3 MODELOS ESTATÍSTICOS PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto existem diversos modelos empíricos, que estabelecem diferentes equações, dependendo do tipo de concreto, também várias equações apresentadas por diferentes bibliografias, além das normas vigentes.

Os modelos empíricos deram origem às equações de estimativa encontradas em normas. Estas equações geralmente relacionam o módulo de elasticidade com a resistência do concreto, e devem ser utilizadas em etapas iniciais de projeto, onde não há especificação detalhada sobre os materiais que irão compor a mistura (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Grande parte das relações empíricas utilizam a resistência à compressão axial do concreto como parâmetros de entrada para prever o módulo de elasticidade, já outros modelos

mais desenvolvidos utilizam o módulo de elasticidade da pasta de cimento e do agregado graúdo. Com a aplicação das equações foi possível observar em alguns estudos que as misturas de concreto com maior resistência à compressão obtiveram maiores valores de módulo de elasticidade, considerando também o efeito do tipo de agregado e a composição mineralógica, empregados por meio das correções dos fatores (ASLANI et. al. 2012; KOCKAL 2015; ACI COMMITTEE 318 2014; BILIR 2016). No entanto, não são apenas esses fatores citados que vem a interferir nos valores de módulo de elasticidade. Dessa forma, o ACI Committee 318 (2014) e o ACI Committee 214 (2011) preconizam que muitas vezes, quando se prevê o módulo por equações normativas, o mesmo poderá estar sendo superestimado, influenciando na capacidade de deformação, incluindo deflexão, curvatura, tensão, sob condições de cargas de serviço.

Estudos realizados por pesquisadores nacionais e internacionais apontam que são muitos fatores que influenciam no módulo de elasticidade, como pode ser observado na Tabela 2.1, e não apenas um ou dois, como mostram as equações das diferentes normas, e ainda deve-se considerar que esses fatores não influenciam sozinhos, ou seja, eles interagem entre si, e que isso também causa interferência no valor do módulo de elasticidade.

Tabela 2. 1 – Estudo dos fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto

AUTORES	VARIÁVEIS INVESTIGADAS	CONCLUSÕES
Li et al. (1999)	Influências de diferentes parâmetros sobre o módulo	Aumentando-se a dimensão máx do agregado graúdo aumentou-se o módulo do concreto. E o aumento do volume de agregados ou redução da espessura da zona de transição aumentaram o módulo.
Kim et al. (2002)	Módulo de elasticidade e resistência à compressão, relacionados à temperatura de cura	O módulo de elasticidade do concreto não é tão influenciado pela temperatura quanto a resistência.
Yıldırım e Sengul (2011)	Efeitos da relação água / cimento, tamanho máximo do agregado, tipo agregado e teor de cinzas volantes	Variação do módulo de elasticidade de acordo com o tipo de agregado graúdo utilizado.- Relação entre módulo e resistência não se encaixam, algumas normas subestimam e outras superestimam o módulo. - Cinzas volantes não alteraram o módulo.
Shoukry et al. (2011)	Diferentes condições de temperatura e umidade para examinar seus efeitos no concreto normal.	A resistência do concreto e o módulo de elasticidade são inversamente relacionados à temperatura, bem como teor de umidade no concreto.

(continua)

Tabela 2.1 – Estudo dos fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto (continuação)

AUTORES	VARIÁVEIS INVESTIGADAS	CONCLUSÕES
Johari et al. (2011)	A influência de materiais cimentícios suplementares (SCMs), nomeadamente sílica ativa, metacaulim, cinza volante escória de alto forno granulada e moída	Apresentam grandes efeitos sobre a resistência à compressão e pequenos efeitos sobre o módulo de elasticidade.
Shariq et al. (2013)	Diferentes idades de ensaios e substituição parcial de cimento por escória granulada de alto forno	Os traços com substituição de escória tiveram o módulo reduzido para as diferentes substituições e idades de ensaio.
Hager e Sliwinski (2013)	Resistência à compressão e módulo de elasticidade sob elevada temperatura	Resistência à compressão e módulo de elasticidade diminuem com o aumento da temperatura
Liu et al. (2014)	Efeito do teor de umidade no módulo de elasticidade	O módulo de elasticidade aumenta com o aumento do teor de umidade. É proposta uma fórmula para o efeito do teor de umidade no módulo de elasticidade do concreto.
Craeyer et al. (2014)	Efeito do volume de pasta e agregado graúdo	Efeito estatisticamente significativo sobre o módulo de elasticidade do concreto.
Souza et al. (2015)	Metacaulim de alta reatividade	Aumento do módulo de elasticidade com o metacaulim.
Jurowski e Grzeszczyk (2015)	Diferentes tipos de agregados graúdos e $d_{m\acute{a}x}$, mantendo o mesmo volume e relação a/c	Influenciaram no valor do módulo.
Lee et al. (2015)	Efeitos do tamanho do corpo de prova (150 por 300 mm e 100 por 200 mm)	Os diferentes tamanhos de corpos de prova não influenciaram na resistência à compressão e nem no módulo de elasticidade.
Beushausen e Dittmer (2015)	Influência do uso de dois tipos de agregados	Com um tipo de agregado se obteve maior resistência e com outro tipo de agregado maior módulo de elasticidade.
Zhou et al. (2015)	A influência do teor volumétrico de agregados, tamanho e diâmetros máximos, relação água-cimento e temperatura de cura	O estudo confirma que a resistência à compressão, módulo de elasticidade estático e módulo de elasticidade dinâmico são influenciados pelo volume de agregado, tamanho máximo e tipo de agregado graúdo, relação água-cimento e temperatura de cura.
Yang et al. (2016)	Estudo da influência da dimensão máxima do agregado graúdo sobre as propriedades do concreto	Diminuindo-se o diâmetro máximo do agregado graúdo, diminuiu-se a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade do concreto.
Kocab (2017)	Diferentes tipos de cura	Influenciou não só no desenvolvimento como também nos valores finais do módulo.

(continua)

Tabela 2.1 – Estudo dos fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto (continuação)

AUTORES	VARIÁVEIS INVESTIGADAS	CONCLUSÕES
Piasta <i>et al.</i> (2017)	Estudo de diferentes composições minerais de rocha	Os maiores valores de módulo de elasticidade foram observados nos concretos de dolomita e basalto e os piores nos concreto de granito.
Tibbetts <i>et al.</i> (2018)	Diferentes tipos de agregados graúdos, para tentar provar que um fator da norma estudada era mais apropriado que outro.	Alterou o módulo de acordo com o tipo de agregado graúdo.
Hussain <i>et al.</i> (2018)	Diferentes tipos de agregados graúdos e sílica ativa.	Os modelos de previsão da ACI mostraram que os modelos devem ser melhorados para predição do módulo para o efeito do tipo agregado com e sem o uso de sílica ativa.
Zhu <i>et al.</i> (2018)	Investigação do efeito de nanofibras de carbono na zona de transição do concreto sobre o módulo de elasticidade	Concretos com nanofibras de carbono melhoraram as propriedades da zona de transição, principalmente aumentando o módulo de elasticidade do concreto.
Girardi (2018)	Influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto	O volume de pasta e agregado, e a natureza do agregado apresentaram grande influência sobre o módulo.
Konsta-Gdoutos, Danoglidis e Shah (2019)	Influência de nanotubos e nanofibras de carbono no módulo de elasticidade do concreto	A resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto podem ser aumentados com adições muito baixas de nanotubos e nanofibras de carbono
Jalal, Nassir e Jalal (2019)	Incorporação de resíduos de borracha e pozolanas no concreto	Substituições de 10 e 15% de borracha no concreto levou a uma redução do módulo de elasticidade de 14 e 32%, respectivamente.
Klein, Lenz e Mazer (2020)	Influência do empacotamento de agregados no módulo de elasticidade estático de concretos com resistência à compressão de 25 e 40 MPa.	O empacotamento produziu um aumento médio no módulo de elasticidade estático do concreto de 21% em 7 dias e 8% em 28 dias.

Conforme a Tabela 2.1 pode-se concluir que entre as variáveis que influenciam de maneira significativa no módulo de elasticidade do concreto, o teor de pasta, litologia do agregado graúdo e resistência à compressão axial do concreto apresentaram grande importância sobre o módulo de elasticidade pela maioria dos estudos. No entanto, o tipo de cura também se apresenta como uma das variáveis influentes, porém quando se estuda concretos pré-moldados, e não, concretos convencionais. Ainda, as adições de superpozolanas estudadas por Johari et. al. (2011) e Padhi et. al. (2018) não apresentaram efeitos significativos sobre o módulo, bem como o teor de argamassa estudado por Girardi (2018).

2.3.1 Equações normativas

No Brasil, a norma que estabelece a equação para o módulo de elasticidade e de deformação do concreto é a NBR 6118 (ABNT). A mesma vem sofrendo atualizações ao longo do tempo. As equações da NBR 6118 nas versões de 1978, 2003 e 2007 baseavam-se somente na resistência à compressão axial do concreto para a determinação do módulo de elasticidade, porém com a atualização para a NBR 6118 (ABNT, 2014), norma em vigor, considera-se na equação não somente a resistência, mas também o tipo de agregado graúdo utilizado na mistura de concreto. Na Tabela 2.2 está representada esta evolução.

Tabela 2. 2 - Atualização das normas brasileiras para determinação do módulo de elasticidade

Versão	Módulo de Elasticidade (E_{ci})	Módulo de Deformação (E_{cs})
1978	$E_{ci} = 6600 \times \sqrt{f_{ck} + 3,5}$	$E_{cs} = 0,90 \times E_{ci}$
2003	Para $f_{ck} \leq 50$ MPa	$E_{cs} = 0,85 \times E_{ci}$
2007	$E_{ci} = 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$	
2014 (atual)	Para $20 \leq f_{ck} \leq 50$ MPa $E_{ci} = \alpha_e \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}}$ Para $55 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa $E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_e \times \sqrt[3]{\frac{f_{ck}}{10} \times 1,25}$ Onde: $\alpha_e = 1,2$ para basalto e diabásico $\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaisse $\alpha_e = 0,9$ para calcário	$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci}$ Onde: $\alpha_i = \left[0,8 + 0,2 \times \left(\frac{f_{ck}}{80} \right) \right]$

Apesar de a NBR 6118 (ABNT, 2014) apresentar duas equações para determinar o módulo, diferenciando-as pela classe de resistência do concreto, e considerar o tipo de agregado graúdo utilizado na mistura, ainda existem pesquisas (Araújo, 2000; Aguilar et. al., 2006; Arruda, 2013; Santos et. al., 2017; Alhadad, 2018; Girardi, 2018, entre outras) que apontam divergências entre os resultados obtidos por meio dessas equações e os resultados obtidos experimentalmente.

Externos ao Brasil os modelos de previsão mais utilizados são os constantes na ACI 318 (2014), no *fib* Model Code (2010) e EUROCODE 2 (2004). Na Tabela 2.3 estão representadas as equações desses modelos.

Tabela 2. 3 - Normativas internacionais para estimar o módulo de elasticidade e a deformação

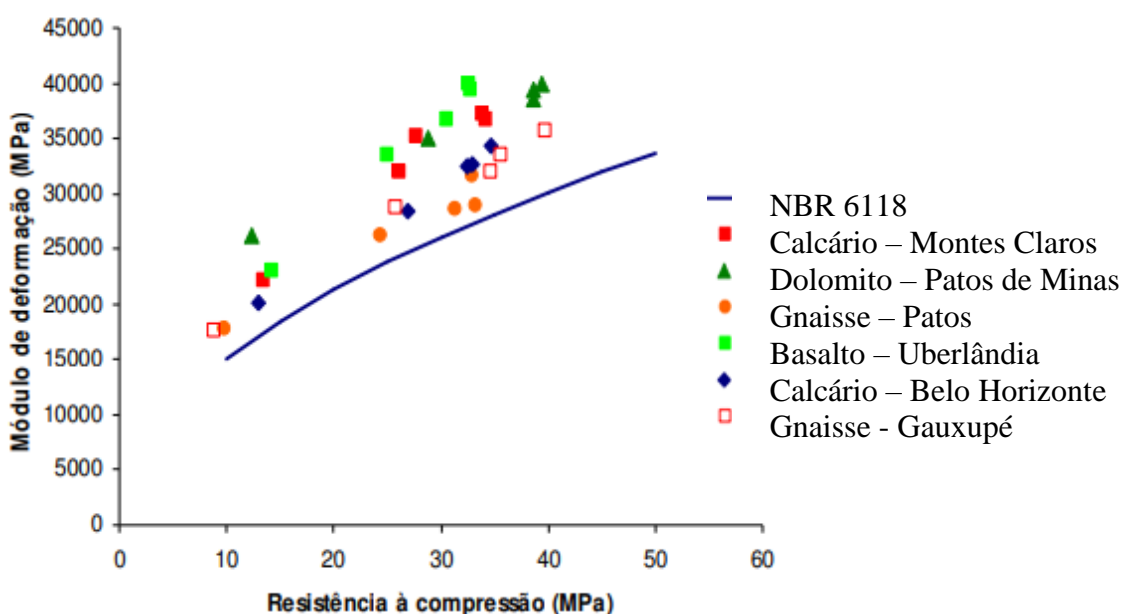
Versão	Módulo de Elasticidade (E_{ci})	Módulo de Deformação (E_{cs})
ACI 3018 (2014)	Determinado a $0,45 f_c$ $E_{ci} = 5170 \times \sqrt{f_{ck}}$	$E_{cs} = 4700 \times \sqrt{f_{ck}}$
fib Model Code (2010)	Para $12 \leq f_{ck} \leq 80$ MPa $E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_e \times \sqrt[3]{\frac{f_{ck}+8}{10}}$ Onde: $\alpha_e = 1,2$ para basalto e diabásico $\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaisse $\alpha_e = 0,9$ para calcário $\alpha_e = 0,7$ para arenito	$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci}$ Onde: $\alpha_i = \left[0,8 + 0,2 \times \left(\frac{f_{ck}}{88} \right) \right]$ f_{cm} : resistência média aos 28 dias
EUROCODE 2 (2004)	Para $12 \leq f_{ck} \leq 90$ MPa $E_{ci} = 23,1 \times \alpha_e \times \left(\frac{f_{ck}+8}{10} \right)^{0,3}$ Onde: $\alpha_e = 1,2$ para basalto e diabásico $\alpha_e = 1,0$ para granito e gnaisse $\alpha_e = 0,9$ para calcário $\alpha_e = 0,7$ para arenito	$E_{cs} = 22 \times \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$ Onde: f_{cm} : resistência média aos 28 dias - Determinado a $0,4 f_{cm}$

Santos *et al.* (2017) estudaram concretos com classes de resistência de 20, 30 e 40 MPa e agregados graúdos de diferentes composições mineralógicas e jazidas e concluíram que a composição mineralógica do agregado graúdo influenciou tanto na resistência à compressão como no módulo de elasticidade do concreto. Quanto à comparação realizada entre o valor do módulo obtido experimentalmente e calculado por meio de equações normativas, os autores concluíram que todas as equações estudadas descrevem a tendência do comportamento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do concreto, porém perceberam que as equações propostas pelas normas NBR 6118 (ABNT, 2007) e ACI 318 (AMERICAN, 2011) apresentaram valores próximos, mas inferiores aos experimentais. No entanto, com os diferentes tipos de agregados estudados e a NBR 6118 (ABNT, 2014), percebeu-se a importância da modificação da norma, que passou a considerar o tipo de agregado, pois com a aplicação da mesma obteve-se valores representativos dos valores experimentais. Já a norma EUROCODE 2 (2004) estimou todos os valores encontrados bem acima das demais

equações e dos resultados experimentais. Desta forma, as equações propostas pelo FIB Model Code (FEDERATION, 2010) e NBR 6118 (ABNT, 2014) foram as que mais se aproximaram dos resultados encontrados.

Ao estudar o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial do concreto, Alhadas (2008) percebeu que havia a necessidade de fazer comparações entre os valores de módulo de elasticidade obtidos experimentalmente e os valores calculados pelas equações normativas propostas. Para tanto, estudou seis diferentes agregados graúdos de jazidas distintas. Com a aplicação dos dados na equação da NBR 6118 (ABNT,2003) obteve o gráfico mostrado na Figura 2.5, representando que todos os resultados obtidos experimentalmente são superiores aos estimados pela norma, indiferente da classe de resistência à compressão (MPa).

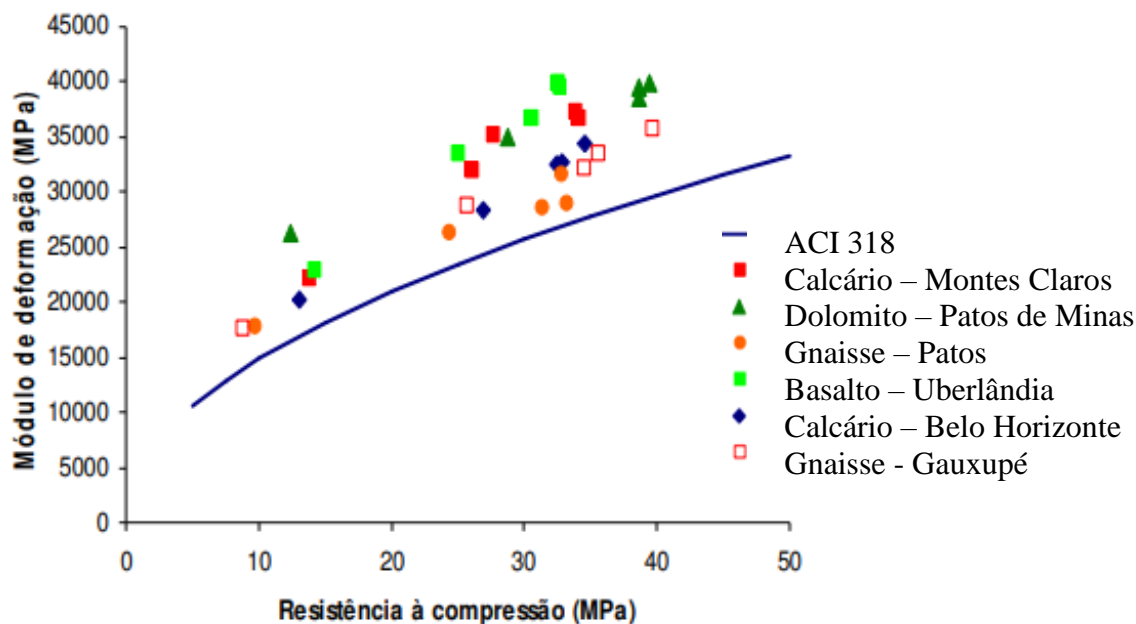
Figura 2. 5 - Comparação entre resultados de módulo de deformação obtidos experimentalmente e pela equação da NBR 6118 (ABNT,2003)



Fonte: Adaptado de Alhadas, 2008

Quando Alhadas (2008) fez o comparativo com a equação da ACI 318, obteve o gráfico apresentado na Figura 2.6.

Figura 2. 6 - Comparação entre resultados de módulo de deformação obtidos experimentalmente e pela equação da ACI 318

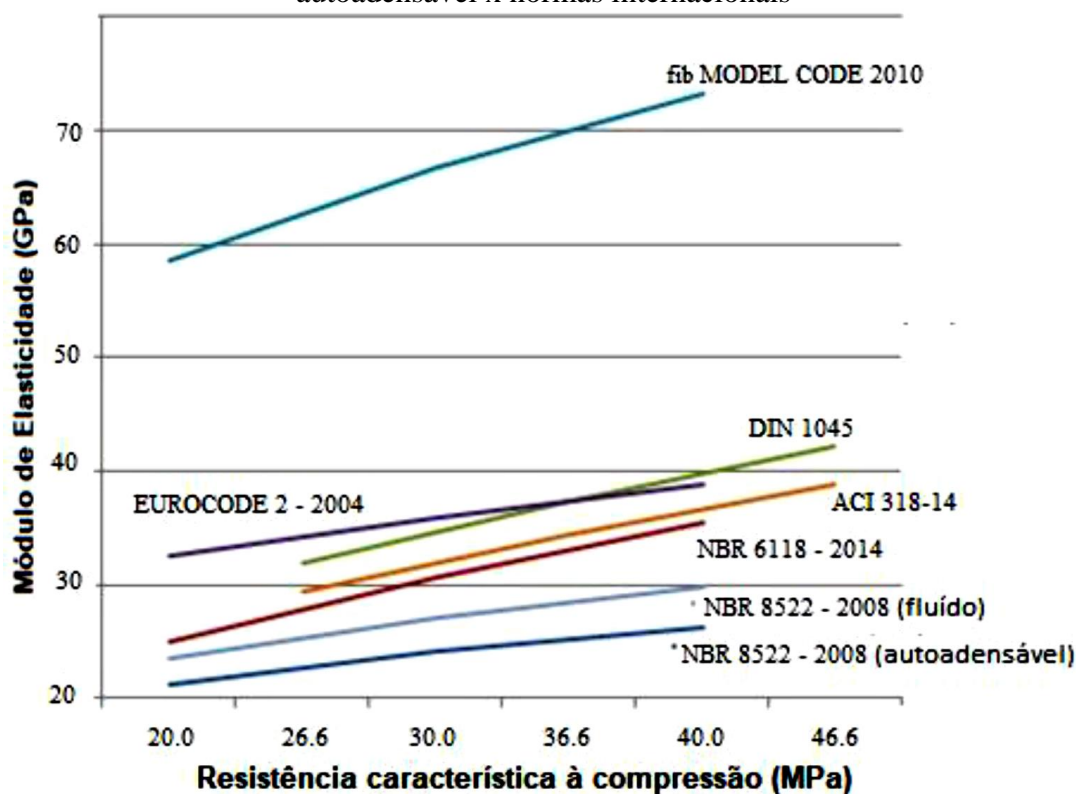


Fonte: Adaptado de Alhadass, 2008

Ao analisar a Figura 2.6 observa-se que os valores obtidos são superiores aos estimados pela equação normativa. Dessa forma, a equação da norma ACI 318 é conservadora, vindo em favor da segurança nos procedimentos de cálculos, no caso dos concretos estudados. Fazer estudos comparativos entre as diferentes normas mundiais que preveem o módulo de elasticidade e comparar com o ensaio experimental é de extrema importância para que se possa afirmar a confiabilidade ou não dos diferentes modelos de previsão.

Cabral (2014) também realizou um estudo comparando o módulo de elasticidade de concretos plásticos e autoadensáveis com diferentes normas internacionais, como apresenta a Figura 2.7.

Figura 2. 7 – Comparação do módulo de elasticidade entre concretos plásticos e autoadensável x normas internacionais



Fonte: Adaptado de Cabral, 2014

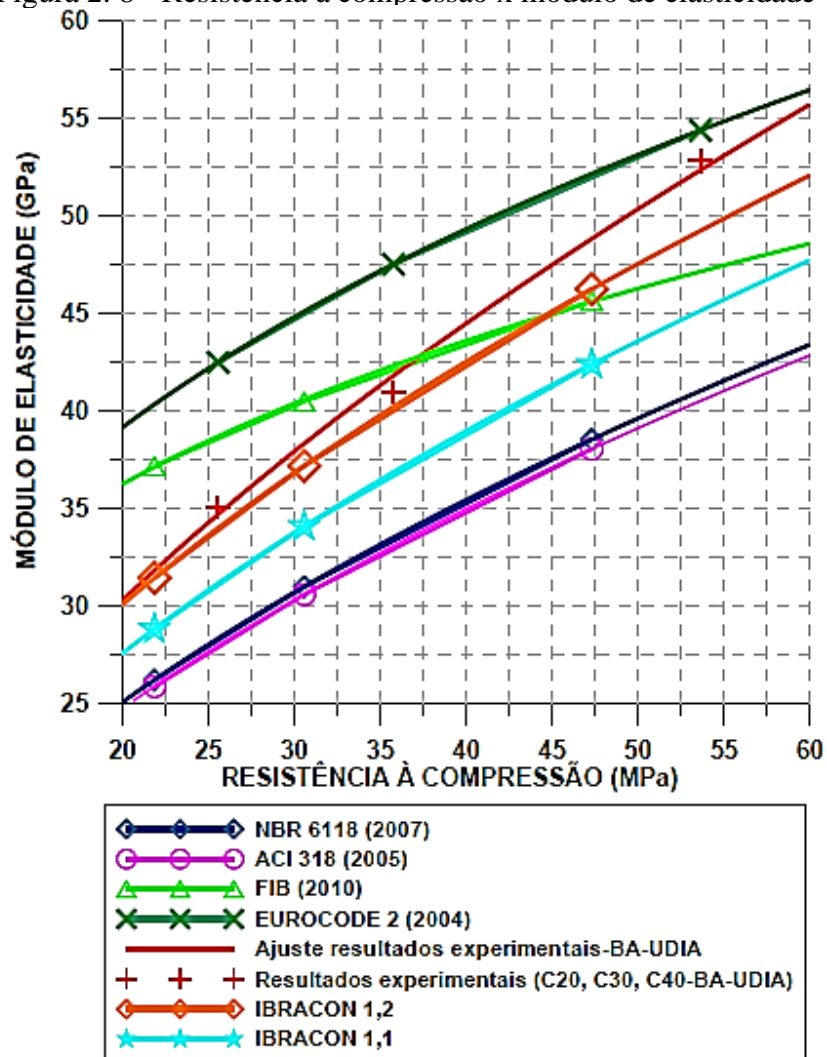
Pode-se observar na Figura 2.7 que tanto para o concreto autoadensável quanto para concreto fluido, todos os modelos de previsão superestimam o módulo para concretos convencionais, quando comparado com os resultados obtidos experimentalmente conforme as diretrizes da NBR 8522 (ABNT, 2008). Percebe-se, portanto, que todos os modelos de previsão estudados por Cabral (2014) são inadequados para a obtenção do módulo de elasticidade do concreto, devido à considerável discrepância entre os valores de E_{ci} experimental e E_{ci} estimado pelas normativas internacionais.

Dentro deste mesmo contexto, na busca por estudos que preveem o módulo de elasticidade, Araújo (2008) realizou uma pesquisa comparando os modelos de previsão fornecidos pela NBR 6118 e a CEB/90. Contudo, ao longo do estudo o autor afirma que, como já se sabe, o módulo de deformação longitudinal varia com a resistência à compressão, mas, no entanto, existem diversos fatores que estão relacionados com a composição do concreto, que também influenciam no valor do módulo, e sendo assim, qualquer correlação entre a resistência à compressão e o módulo podem levar a erros graves. O mesmo autor ainda menciona algo bastante interessante sobre a equação usualmente utilizada no Brasil para a previsão do módulo, afirmando que a mesma não foi obtida em ensaios realizados no Brasil, e que esta equação foi

retirada do ACI, e apenas alterado o coeficiente que multiplica $\sqrt{f_{ck}}$, dessa forma a equação estabelecida pela NBR 6118 não é original e não representa os concretos produzidos no território nacional. Por fim, conclui que a fórmula da antiga CEB/90, atual *fib* Model Code (2010), é a que melhor representa a correlação entre o módulo e a resistência à compressão do concreto, sugerindo que a mesma seja incorporada na revisão da norma brasileira.

No mesmo sentido, a pesquisa realizada por Arruda (2013) buscou correlacionar as principais normas, NBR 6118 (ABNT, 2007), ACI 318 (2011), FIB (2010), EUROCODE 2 (2004), com resistência à compressão do concreto e o módulo de elasticidade. A EUROCODE 2 (2004) resultou em valores superiores aos demais. Já a IBRACON 1,2 (calcário sedimentar denso) foi a que mais se aproximou dos resultados encontrados experimentalmente. E a NBR 6118 (2007) e a ACI (2011) resultaram em valores menores que os experimentais, Figura 2.8.

Figura 2. 8 - Resistência à compressão x módulo de elasticidade



Fonte: Adaptado de Arruda, 2013

2.3.2 Modelos propostos por pesquisadores

Como apresentado nos itens anteriores, grande parte das equações das normas, tanto nacionais como internacionais, apresentam a determinação do módulo de elasticidade do concreto baseado na resistência à compressão axial do concreto, geralmente aos 28 dias de idade. Na Tabela 2.4 buscou-se apresentar os diferentes modelos de previsão estabelecidos por meio de pesquisas de vários autores.

Tabela 2. 4 - Predição do módulo de elasticidade proposto por diferentes autores

Autores	Equações	Observações
Carrasquillo, Slate e Nilson (1981)	$E_{cs} = 3320 \cdot \sqrt{f_c} + 6900$	Calcário e seixo $21 \leq f_c \leq 83$ MPa
King (1983)	$E_{ci} = 1,26 \cdot E_d - 29,5$	Rochas ígneas e metamórficas
Tizato e Shehata (1987)	$E_{cs} = 4250 \cdot \sqrt{f_{cm}}$	-
Eissa e Kazi (1988)	$E_{ci} = 0,74 \cdot E_d - 0,82$	Diferentes tipos de rochas
Christaras et. al. (1994)	$E_{ci} = 1,05 \cdot E_d - 3,16$	Rochas sedimentares
Gomes (1995)	$E_{cs} = 8142 \cdot f_c^{0,37}$	Traquito e Gnaisse
Ferrari (1995)	$E_{cs} = 3691 \cdot \sqrt{f_c} + 5445$	Calcário e Gnaisse $10 \leq f_c \leq 80$ MPa
Dal Molin e Monteiro (1996)	$E_{cs} = 9570 \cdot f_{ck}^{0,31}$	Basalto $20 \leq f_c \leq 90$ MPa
Melo Neto e Helene (2002)	$E_{cs} = 3,3736 \cdot f_c^{0,6002}$	Granito $20 \leq f_c \leq 30$ MPa São Paulo/SP
Fahimifar e Soroush (2003)	$E_{ci} = e^{(0,0477 \cdot E_d)}$	Diferentes tipos de rocha
Nunes (2005)	$E_{ci} = 5,0 \cdot f_{ck}^{0,5} \pm 3,42$	Gnaisse e Sienito Rio de Janeiro/RJ
Pacheco (2006)	$E_{ci} = 5400 \cdot f_{cm}^{0,5}$	Granito Vitória/ES
Silva et. al. (2008)	$E_{ci} = 0,0322 \cdot f_c^2 - 0,9425 \cdot f_c + 42,929$	Granito $18 \leq f_c \leq 32$ MPa Salvador/BH

(continua)

Tabela 2.4 - Predição do módulo de elasticidade proposto por diferentes autores
(continuação)

Autores	Equações	Observações
Martins (2008)	$E_{cs} = 10,467 \cdot f_c^{0,2693}$	Granito Amostra (10x20 cm) $25 \leq f_c \leq 55$ MPa Goiânia/GO
	$E_{cs} = 9,3309 \cdot f_c^{0,2679}$	Granito Amostra (15x30 cm) $25 \leq f_c \leq 55$ MPa Goiânia/GO
Barbosa (2009)	$E_{ci} = 7720 \cdot \sqrt[3]{f_c}$	Granulito $29 \leq f_c \leq 51$ MPa Goiânia/GO
	$E_{ci} = 6320 \cdot \sqrt{f_c}$	Basalto $28 \leq f_c \leq 47$ MPa Goiânia/GO
	$E_{ci} = 4470 \cdot \sqrt{f_c}$	Macaxisto $28 \leq f_c \leq 46$ MPa Goiânia/GO
Leal (2012)	$E_{cs} = 13,783 \cdot f_{ck}^{0,2306}$	Calcário $15 \leq f_{ck} \leq 45$ MPa Brasília/DF
Cabral (2014)	$E_{ci} = \frac{41}{2a^b c}$	Granito $0,45 \leq a/c \leq 0,75$ São Paulo/SP
Kummer (2016)	$E_{ci} = 14,225 \cdot f_{ck}^{0,2325}$	Basalto $20 \leq f_{ck} \leq 50$ MPa Lajeado/RS
Bilesky (2016)	$E_{cs} = -0,0054 \cdot f_c^2 + 0,8035 \cdot f_c + 9,3494$	Calcário $20 \leq f_c \leq 80$ MPa São Paulo/SP
	$E_{ci} = -0,0058 \cdot f_c^2 + 0,926 \cdot f_c + 8,8833$	
	$E_{cs} = -0,0049 \cdot f_c^2 + 0,8587 \cdot f_c + 6,9334$	Diabásio $20 \leq f_c \leq 80$ MPa São Paulo/SP
	$E_{cs} = -0,0046 \cdot f_c^2 + 0,7539 \cdot f_c + 7,0497$	
	$E_{ci} = -0,0053 \cdot f_c^2 + 0,9721 \cdot f_c + 6,8743$	Granito $20 \leq f_c \leq 80$ MPa São Paulo/SP
	$E_{ci} = -0,0051 \cdot f_c^2 + 0,8568 \cdot f_c + 6,996$	
Asef e Farrokhrouz (2017)	$E_{ci} = 0,88 \cdot E_d \cdot (1 - \varphi) - 3,7$	-
Bui et al. (2018)	$E_{ci} = \sqrt[4]{(1,8 \cdot f_c)^3} + 0,54$	-

Onde:

a/c = relação água/cimento;

E_{ci} = módulo de elasticidade;

E_{cs} = módulo de deformação secante;

E_d – módulo de elasticidade dinâmico;

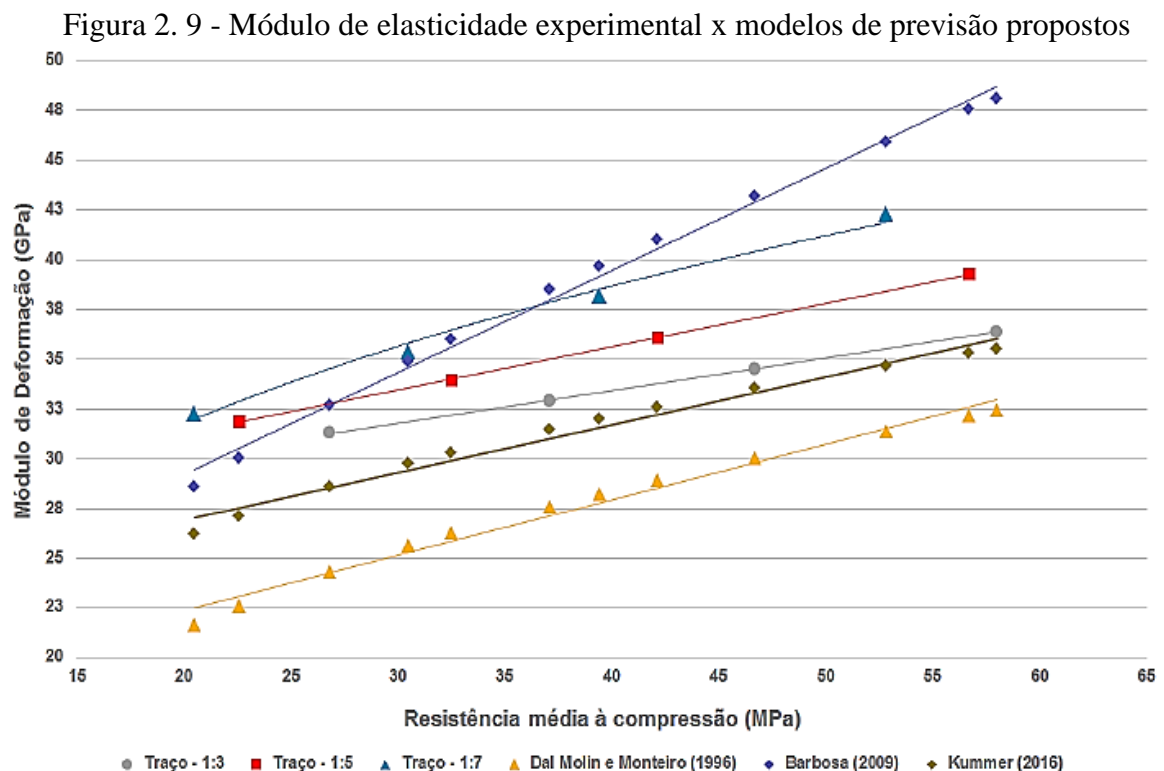
f_c = resistência à compressão;

f_{cm} = resistência média à compressão;

f_{ck} = resistência característica à compressão.

φ = porosidade do material

Girardi (2018) comparou os valores que obteve experimentalmente com diferentes traços de concreto (1:3; 1:5 e 1:7) com os valores calculados pelas equações propostas por Dal Molin e Monteiro (1991) e Kummer (2016), em que foi possível perceber que grande parte dos resultados foram superiores aos determinados pelos modelos propostos (Figura 2.9).

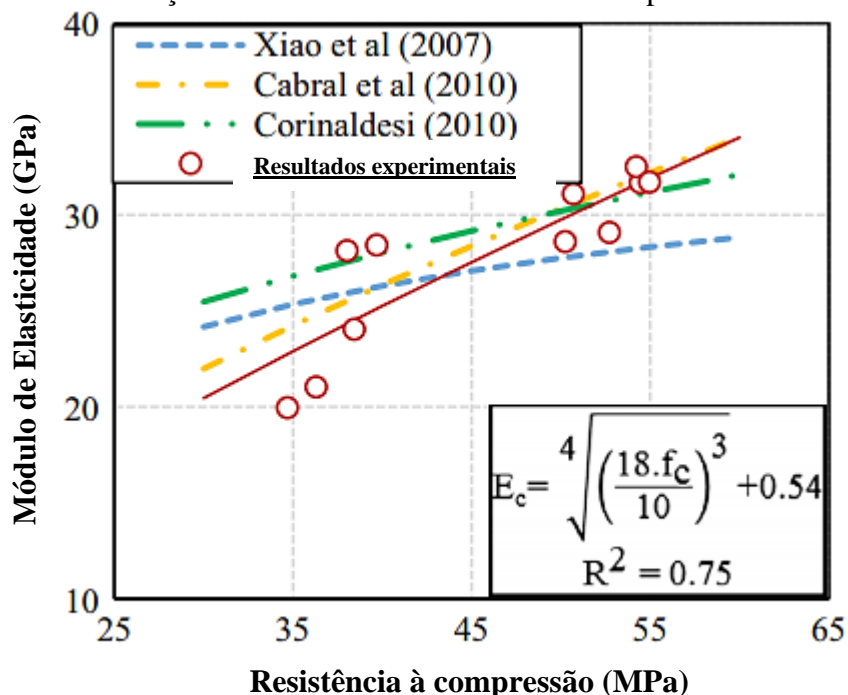


Fonte: Adaptado de Girardi, 2018

O modelo proposto por Kummer (2016) apresentou resultados próximos do traço 1:3. Já a proposta de Dal Molin e Monteiro (1991) conduziu aos menores valores de módulo de deformação do concreto para qualquer situação. E o modelo proposto por Barbosa (2009)

apresentou os maiores valores para o módulo, se aproximando do traço 1:7. Com o mesmo intuito de correlacionar os resultados experimentais do módulo de elasticidade do concreto e os estimados pelo modelo de regressão e demais modelos conhecidos na literatura, Bui e Takahashi (2018) formularam o gráfico da Figura 2.10.

Figura 2. 10 - Relação entre o módulo de elasticidade experimental e estimado

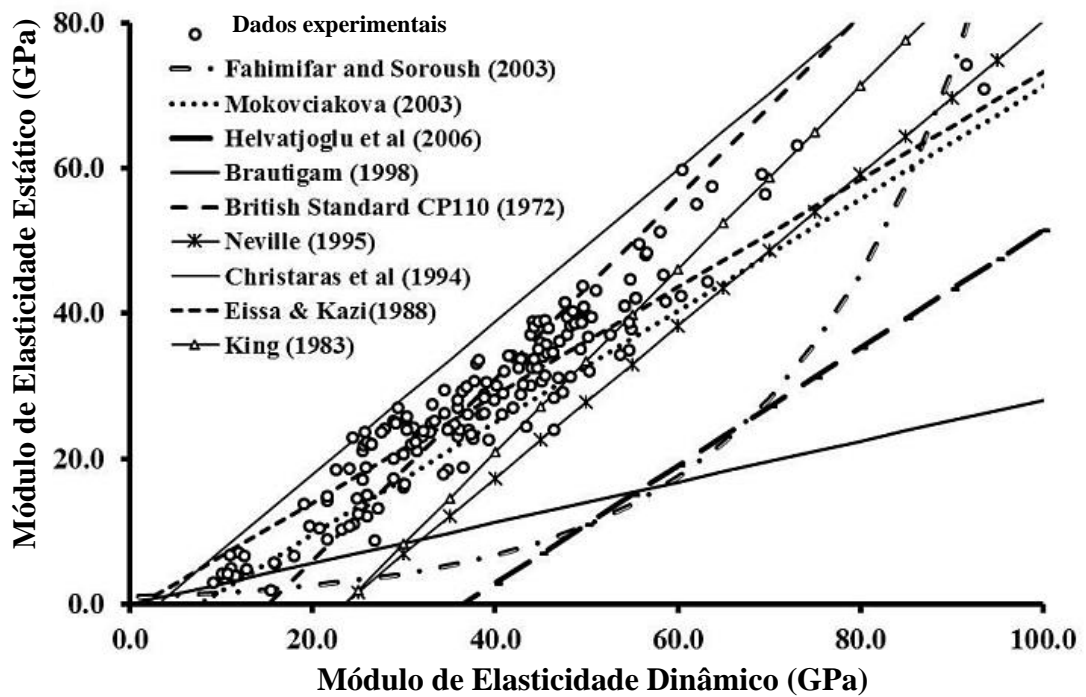


Fonte: Adaptado de Bui e Takahashi, 2018.

O gráfico da Figura 2.10 mostra que o modelo de regressão estabelecido por Bui e Takahashi (2018) parece se adequar melhor aos resultados experimentais do que os demais modelos utilizados na comparação. Ainda ao relacionar a resistência à compressão com o módulo de elasticidade, se pode observar que o módulo aumentou com o aumento da resistência para todos os resultados.

Asef e Farrokhrouz (2017) analisaram a discrepância entre os valores do módulo de elasticidade tanto estático quanto dinâmico em relação aos valores experimentais e os estimados por diferentes modelos propostos pela literatura, Figura 2.11.

Figura 2. 11 - Dispersão dos resultados experimentais e estimados para o módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Asef e Farrokhrouz, 2017.

Como podem ser visualizados, os pontos experimentais estão altamente dispersos dos muitos dados estimados, dessa forma, pode-se inferir que muitas previsões para o módulo de elasticidade estão longe da realidade. Sendo assim, a maioria das equações requer revisões.

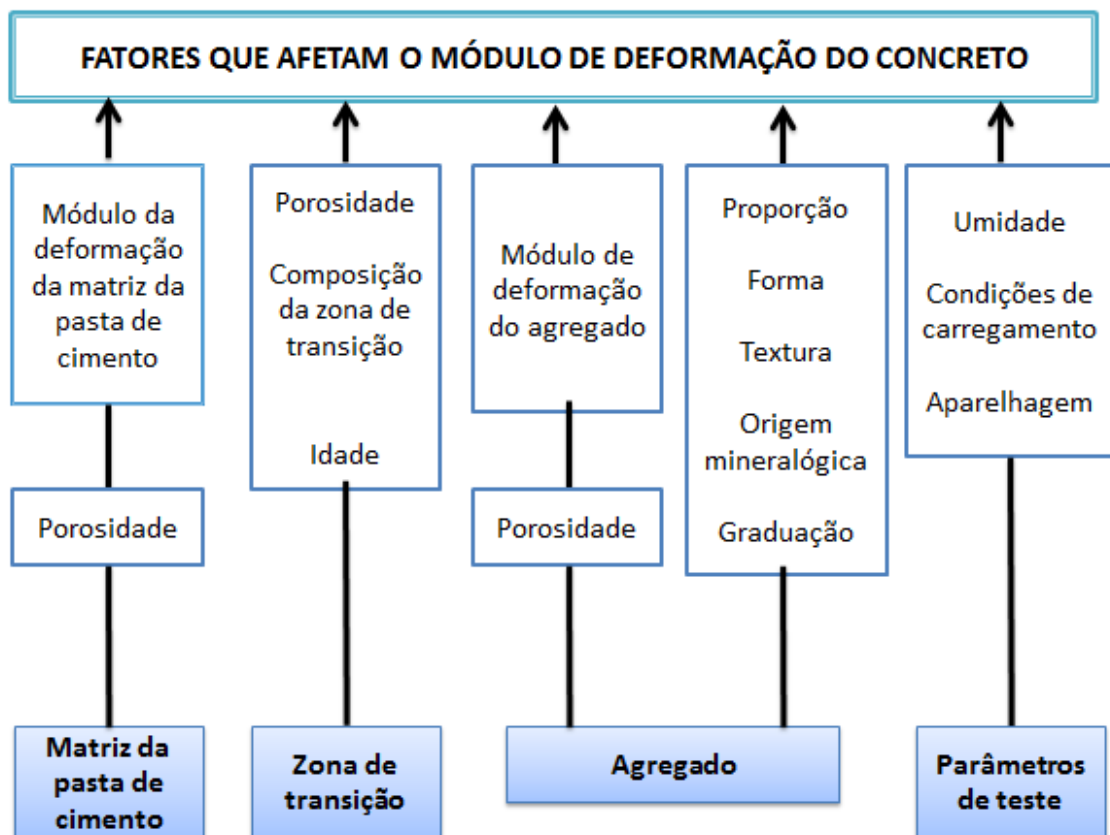
3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

A grande maioria dos projetos estruturais levam em conta apenas a resistência à compressão (f_{ck}), a resistência à tração (f_{ct}) e o módulo de elasticidade (E_c) do concreto para o seu dimensionamento. Mas a f_{ct} e o E_c são estimados a partir de modelos de normas e normalmente não são ensaiados experimentalmente. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que o estudo do módulo de elasticidade do concreto é bastante complexo e envolve quatro grandes fatores que o influenciam, como:

- Matriz da pasta de cimento;
- Zona de transição;
- Agregado;
- Parâmetros de teste.

A Figura 3.1 apresenta mais detalhadamente cada um desses fatores.

Figura 3. 1 - Fatores que influenciam no módulo de deformação do concreto



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro, 2008

Na Figura 3.1 é possível verificar que os fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto estão divididos em duas áreas, uma delas relacionada com as propriedades do concreto e dos materiais que o compõe e, a outra, voltada para os parâmetros de ensaios.

Os próximos itens apresentam de maneira detalhada cada um dos quatro grupos que influenciam o módulo de elasticidade do concreto.

3.1 ESTRUTURA INTERNA DO CONCRETO

O concreto apresenta uma estrutura interna heterogênea e altamente complexa, podendo ser estudado como um material constituído de partículas de agregado, envoltas por uma matriz porosa de pasta de cimento, com uma zona de transição entre as duas fases, constituída de características próprias. Essas três principais fases são denominadas: matriz da pasta de cimento, zona de transição (ZT) e agregado.

3.1.1 Matriz da pasta de cimento

Em uma mistura de concreto de cimento Portland a função da matriz da pasta de cimento é envolver tanto os grãos de agregados miúdos como os de graúdos. A principal composição dessa matriz são os compostos hidratados de cimento como os silicatos de cálcio hidratado C-S-H com morfologia geralmente fibrosa, o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 que se cristaliza em placas hexagonais sobrepostas e ainda a etringita (sulfoaluminato de cálcio) que se cristaliza no início da hidratação em forma “agulhas”.

A hidratação do cimento Portland evolui com o tempo, tendo aos 28 dias de cura cerca de 70-80% de grau de hidratação (GUÉNOT-DELAHAIE, 1996; TAYLOR, 1997), dependendo do tipo de cimento, e praticamente se completando aos 365 dias (TAYLOR, 1997). Malachanne *et al.* (2018) apresentam a evolução do módulo de elasticidade da pasta de cimento x período de hidratação, Tabela 3.1, mas não deixam claro qual o tipo de cimento utilizado e nem a relação água/cimento da pasta. Todo o processo de hidratação é essencial para redistribuir e reduzir os poros ativos que dependem da relação a/c da mistura. Percebe-se que a partir dos 28 dias de idade não há diferença no valor do módulo.

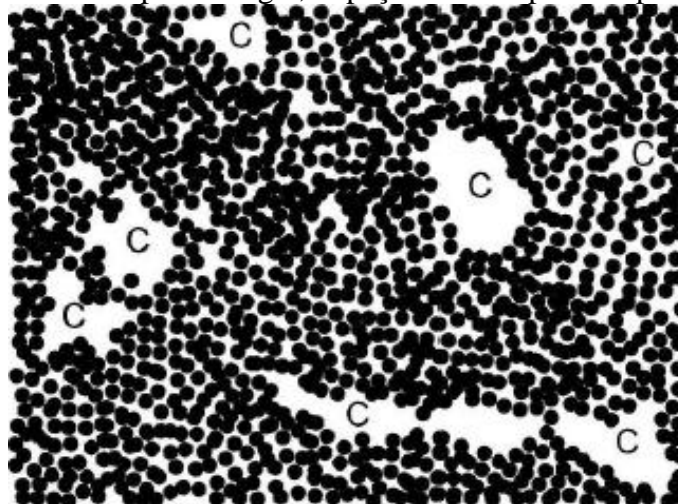
Tabela 3. 1- Módulo de elasticidade da pasta em vários períodos de hidratação

Tempo de hidratação (dias)	Módulo de elasticidade (GPa)
2	6,3
7	9,3
15	12,4
28	12,4
90	12,5

Fonte: Adaptado de Malachanne *et al.*, 2018

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) existem vários tipos de vazios na pasta de cimento, como pode ser observado na Figura 3.2. Os mesmos são classificados em: poros de gel, que estão presentes no espaço interlamelar do C-S-H, com tamanho entre 5 e 10 nm; poros capilares, possuem tamanho na faixa de 0,01 a 10 μm , e ocupam o espaço deixado pelos componentes sólidos da pasta; e os poros de ar aprisionado, cujo tamanho pode variar de 50 a 200 μm , influenciando significativamente na resistência e no módulo de elasticidade do concreto. O volume e tamanho dos poros vão depender da relação a/c e do grau de hidratação do cimento, sendo que a influência nas propriedades mecânicas do concreto vai depender também da continuidade dos poros.

Figura 3. 2- Modelo da estrutura da pasta – Pontos cheios: partículas de gel; Espaços intersticiais: poros de gel; Espaços com C: poros capilares



Fonte: Adaptado de Neville, 1997

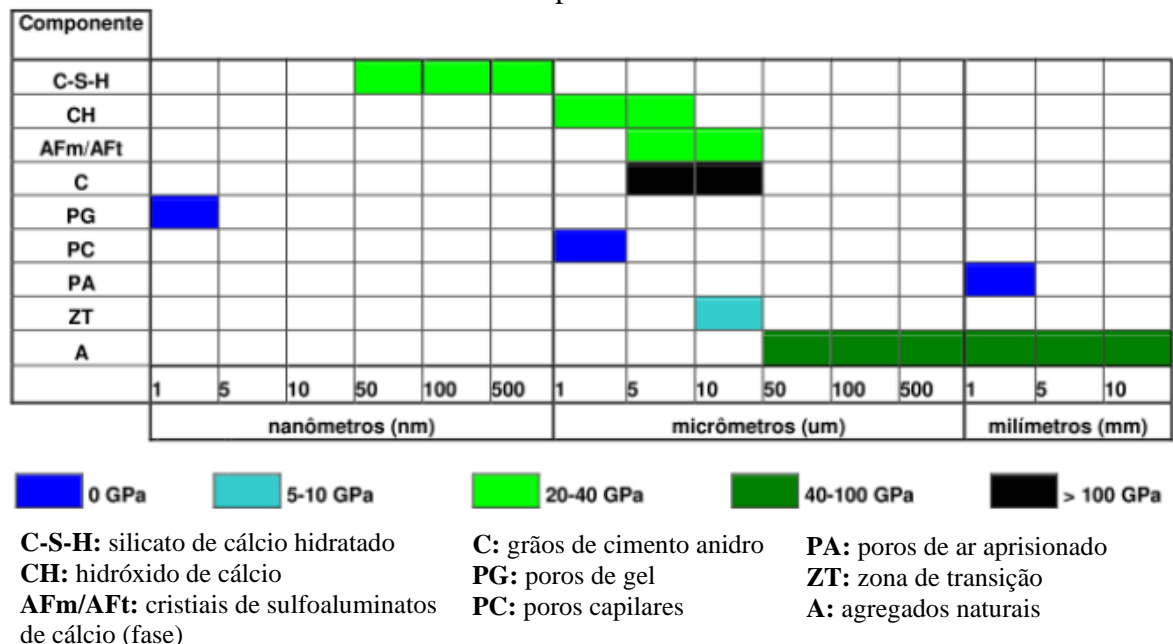
Para Jennings (2000 e 2004), a fluência de materiais à base de cimento ocorre predominantemente em produtos de gel de pasta de cimento. Os produtos de gel contêm várias fases químicas, entre as quais silicato hidratado de cálcio (C-S-H) ocupa a maior parte. Os silicatos são responsáveis pelo enrijecimento da pasta e evolução da resistência do concreto. Conforme Giammusso (1992) o grau de hidratação da pasta vai depender da idade do concreto

e da composição química do cimento, pois concomitantemente com a hidratação do cimento, os espaços ocupados por um gel formado por cimento e água vão sendo substituídos por pasta hidratada.

Em relação à composição do cimento, Pacheco (2006) afirma que se as porcentagens de C_3S e C_3A forem altas, tanto a resistência à compressão como o módulo de elasticidade nas idades de 7, 14 e 28 dias serão altos também; por outro lado, se a proporção de C_2S for alta a resistência e o módulo de elasticidade inicial serão baixos, mas a resistência e o módulo final serão altos. No entanto, o módulo de elasticidade do concreto e da argamassa somente se estabilizam quando a hidratação da pasta de cimento chega próximo ao final, fato que ocorre após os 28 dias (Sideris et. al. 2004).

Ao considerar que a deformação do concreto depende também da distribuição espacial de todos os elementos que o compõem, Montija (2007) formulou em um diagrama de barras as dimensões de cada um dos componentes do concreto e as respectivas faixas esperadas de módulo de elasticidade, conforme a Figura 3.3. Vale ressaltar que os valores de módulo obtidos por nanoindentação ou AFM evoluíram nos últimos anos.

Figura 3. 3- Dimensões dos componentes do concreto e respectivos módulos de elasticidade esperados



Fonte: Adaptado de Montija, 2007

A Figura 3.3 mostra que o módulo de elasticidade dos grãos de cimento anidro e das partículas de C-S-H apresentam-se em torno de 100 GPa ou maior e, entre 20 e 40 MPa, respectivamente. Em estudos realizados por Boumiz *et al.* (1997) e Damidot *et al.* (2003) o

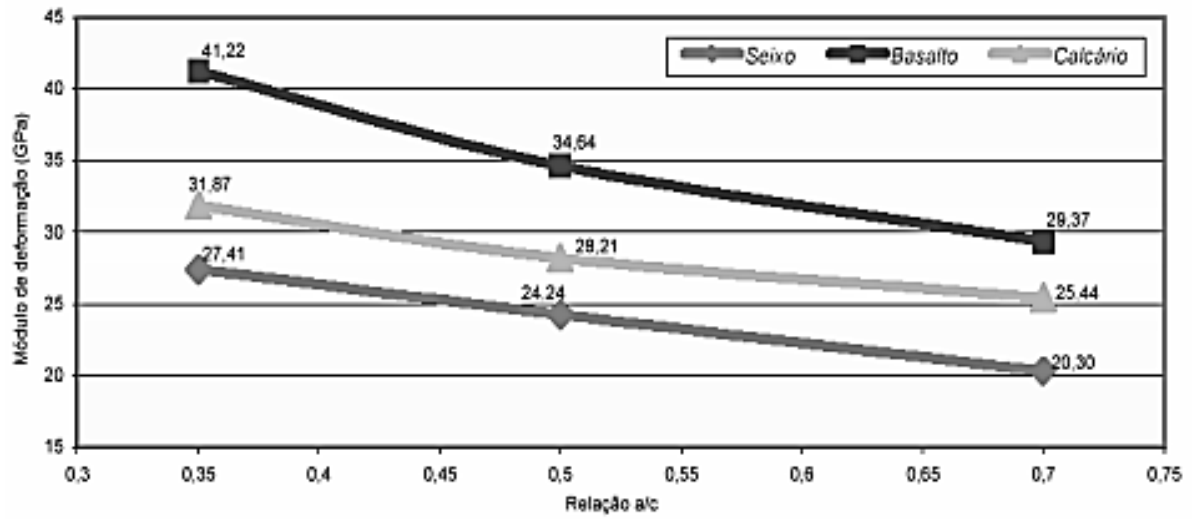
módulo de elasticidade para os mesmos fatores analisados apresentaram-se próximos, em que se obteve 117,6 GPa para os grãos de cimento anidro e 22,4 GPa para as partículas de C-S-H. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), os C-S-H constituem a maior porcentagem de volume de sólidos na pasta de cimento endurecida, cerca de 50 a 60%, caracterizando, assim, importante função na resistência à compressão e rigidez da pasta endurecida. Em relação aos agregados, o módulo da areia natural e dos agregados graúdos podem ser muito diferentes, alterando o módulo do concreto.

Nos primeiros estágios da hidratação do cimento Portland são formados os cristais de sulfoaluminatos de cálcio, os quais resultam da relação iônica sulfato-alumina. Para os compostos AFt e AFm, Garboczi *et al.* (2007) adotaram para o módulo de elasticidade os mesmos valores que utilizaram para o C-S-H (22,4 GPa) e CH (42,3 GPa), respectivamente.

O aumento da relação água/cimento do concreto afeta negativamente a pasta de cimento, a zona de transição pasta/agregado e a porosidade, os quais diminuem o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. As pesquisas realizadas por Bawa e Graft-Johnson (1969), Lydon e Iacovou (1995), Melo Neto e Helene (2002), Silva (2003), Bilesky (2016), entre outras, evidenciam este fato, e apresentam os resultados experimentais de medidas do módulo de elasticidade para variadas relações água/cimento e consistência fixa.

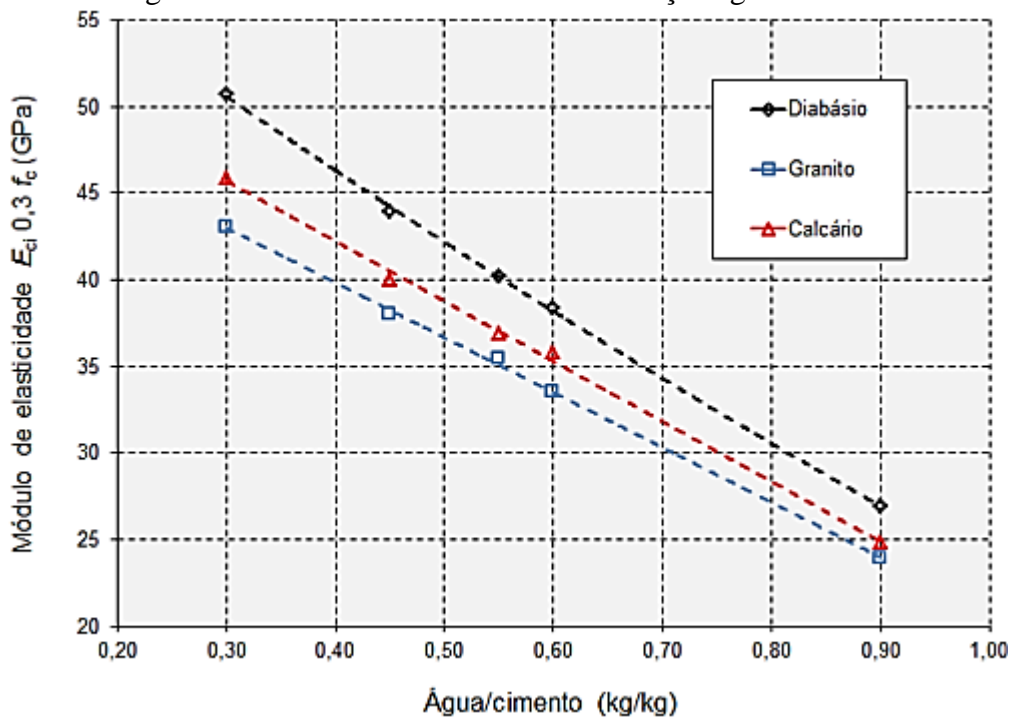
Para Bauer, Pereira e Leal (2012) e Xie *et al.* (2015) existe uma relação inversa entre a relação água/cimento e o módulo de elasticidade do concreto, pois o aumento da relação água/cimento resulta em uma matriz cimentícia mais porosa, de menor rigidez. Dessa forma, se a quantidade de cimento não for alterada no sistema e a quantidade de água variar, os compostos resistentes (C-S-H; CH AFt) não irão se alterar, pois a massa de cimento será a mesma, porém irá aumentar a porosidade capilar, devido à quantidade de água livre, reduzindo dessa maneira a rigidez do concreto. Essa influência também foi estudada por Silva (2003) que analisou o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade, utilizando agregado graúdo de calcário, seixo e basalto, ambos da região de Goiás, com diferentes relações água/cimento (Figura 3.4). Os resultados comprovam que, ao diminuir a relação água/cimento a tendência é de aumentar o módulo de deformação do concreto. Bilesky (2016), investigando as variáveis que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, obteve a mesma conclusão ao estudar concretos com agregados de diabásio, granito e calcário, Figura 3.5. O mesmo foi verificado por Haecker *et al.* (2005), Figura 3.6.

Figura 3. 4 - Influência da relação água/cimento no módulo de deformação do concreto



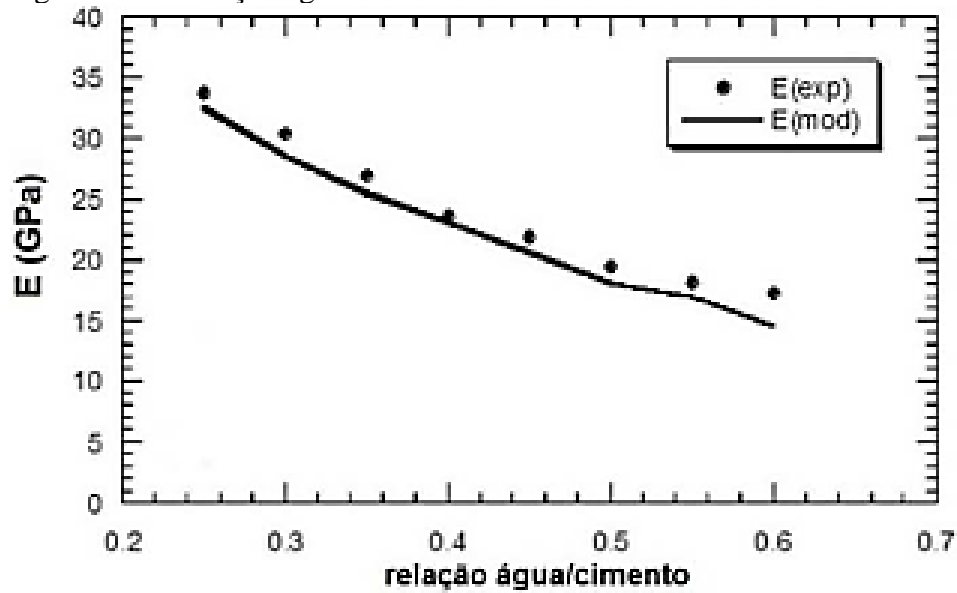
Fonte: Adaptado de Silva, 2003

Figura 3. 5 - Módulo de elasticidade x relação água/cimento



Fonte: Adaptado de Bilesky, 2016.

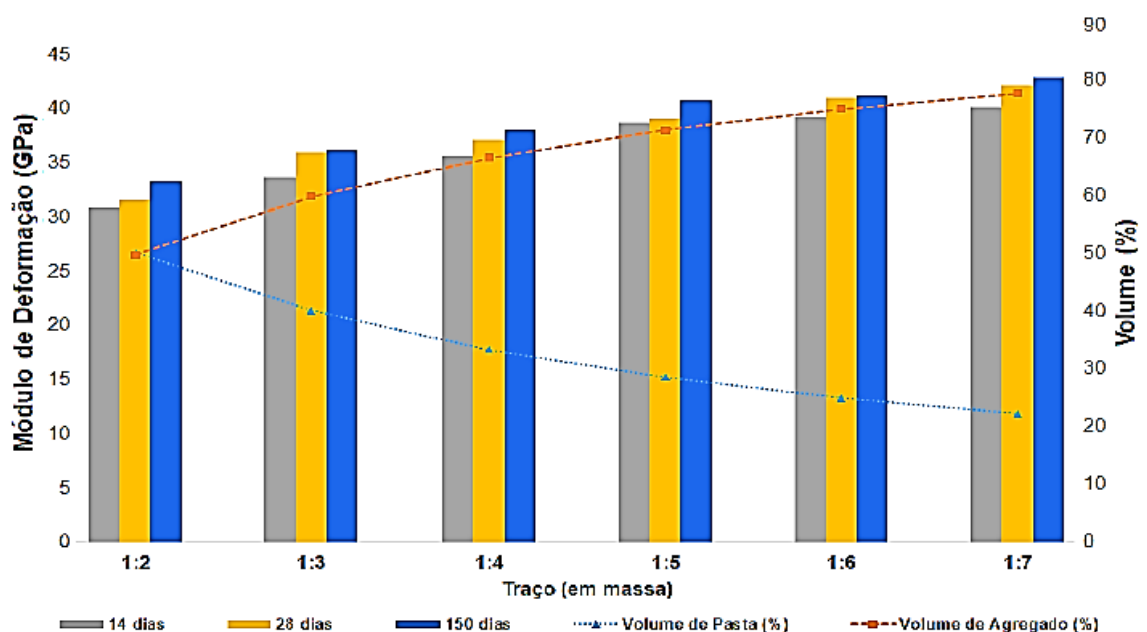
Figura 3. 6 - Relação água/cimento e o módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Adaptado de Haecker et. al., 2005.

Girardi (2018) relacionou a alteração do módulo de elasticidade do concreto com o aumento volume de pasta na proporção da mistura e a redução da quantidade de agregados, verificando que essa condição ocasiona um aumento na deformabilidade do concreto, Figura 3.7. É importante ressaltar que esse comportamento irá ocorrer quando o agregado tiver resistência/massa específica superior ao da pasta.

Figura 3. 7 - Influência do volume de pasta e agregados sobre o módulo de deformação do concreto



Fonte Adaptado de Girardi, 2018

Girardi (2018) concluiu que a redução do volume de pasta provocou um crescimento no valor do módulo de deformação. Com a redução do volume de pasta de 50,2% para 22,3%, nos traços 1:2 e 1:7, respectivamente, houve alteração no valor do módulo de deformação em 30,5% para a idade de 14 dias; 33,5% aos 28 dias e 28,8% aos 150 dias.

3.1.2 Zona de transição

O concreto é composto macroscopicamente por duas zonas distintas, que são os agregados e a pasta de cimento hidratada. Já em nível microscópico é possível identificar mais uma zona, que é composta pela pasta de cimento hidratada junto às faces das partículas de agregado, denominada zona de transição, ou seja, é a interface da pasta de cimento hidratada e as partículas de agregado. Xie Y *et al.* (2015) afirmam que a microestrutura da zona de transição no concreto varia muito do que é encontrado na pasta de cimento (maior porosidade, precipitação de cristais de portlandita grandes e achatados, e maior conteúdo de etringita). Para Jin L. *et al.* (2015) esta considerada a terceira fase constituinte do concreto, juntamente com o agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada.

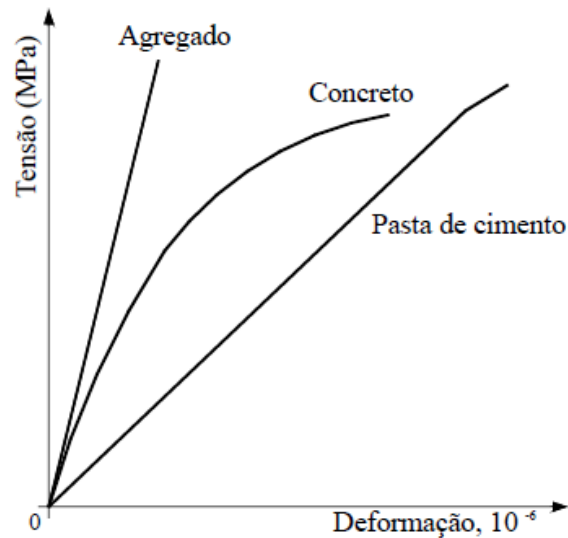
A interface entre agregados e pasta de cimento, geralmente de espessura de até 50 μm (PAULON e KIRCHHEIM, 2011), é conhecida como o “elo fraco” do concreto, devido ao grande volume de vazios e fissuras na região, além da presença de CH pouco cristalino (MEHTA E MONTEIRO, 2014).

A zona entre a pasta de cimento e agregados apresenta diferentes propriedades microestruturais e mecânicas do que as outras duas zonas, que nem sempre são claramente definidas. No entanto, as propriedades mecânicas específicas em torno dos agregados devem ser levadas em conta (NEUBAUER *et al.*, 1996). Para o módulo de elasticidade da zona de transição, Hashin e Monteiro (2002) recomendam o seu valor estimado em torno de 50% daquele atingido pela pasta de cimento. Mehta e Monteiro (1994) fazem referência ao módulo de pastas endurecidas em que os valores variam entre 7 e 28 GPa, podendo estes serem considerados para a medida da rigidez da zona de transição. Contudo, a diminuição da relação a/c aumenta a adesão dos agregados à pasta de cimento e a resistência à compressão, pois estão associados à espessura e porosidade da zona de transição (ELSHARIEF e OLEK, 2003; KUCHARSKA, 1998; S. FIC e SZELAG, 2015).

A Figura 3.8 mostra a curvatura de tensão-deformação do concreto apresentado por Neville (1997), que apresenta a não – linearidade do diagrama, sendo explicada pela existência da zona de transição e de suas microfissuras, que acabam surgindo mesmo em situações de

serviço e levam à progressiva perda de rigidez.

Figura 3. 8 - Tensão deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto

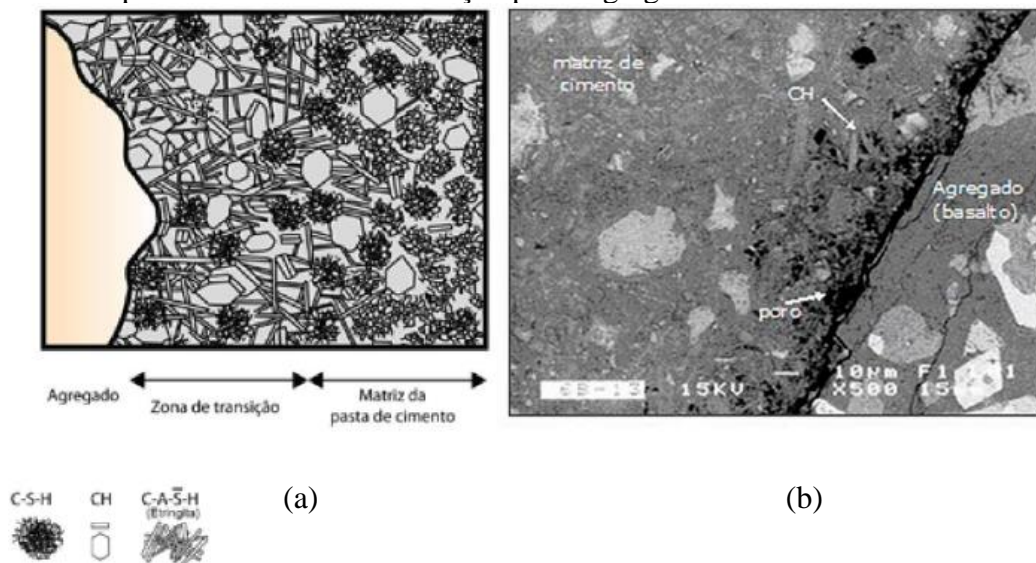


Fonte: Neville, 1997

A influência do agregado no valor do módulo só poderá ser percebida em idades mais avançadas, pois nas primeiras idades, a pasta é que exercerá grande influência sobre o módulo. Com o tempo, a pasta ganha resistência e os esforços são transferidos para os agregados.

Na Figura 3.9 está representada a zona de transição, onde se percebe que a ruptura do concreto ocorre com tensão menor do que nos agregados e na pasta de cimento.

Figura 3. 9- (a) Representação da zona de transição do concreto e (b) MEV por elétrons retroespalhados da zona de transição pasta-agregado do concreto com basalto



Fonte: Mehta e Monteiro, 2008

Muitas vezes não são necessários níveis muito altos de tensão para que ocorra o aumento das fissuras na zona de transição, em torno de 50% da resistência última, mas depende muito da classe de resistência do concreto que se está utilizando. Desta forma, tensões acima de 50% da carga última permitem o início das fissuras na matriz, em que estas se espalham e se unem com as já existentes na zona de transição, e quando se tornam contínuas o material rompe-se.

No entanto, é necessário que a quantidade de energia seja significativa para que ocorra a formação e propagação das fissuras na matriz sob ação de cargas de compressão (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

3.1.3 Agregado

Os agregados são componentes importantes do concreto, e tem grande influência nas propriedades do mesmo. Geralmente são responsáveis por 80% a 90% da massa total de concreto e mais de 80% do volume total (GAN et al. 2015; JEBLI et. al. 2016). Vários estudos revelam que a seleção de agregados graúdos é um aspecto importante para transmitir as características ao concreto, o tamanho, o conteúdo, a forma, a rigidez e a textura do agregado causam um impacto profundo nas propriedades mecânicas do concreto (EINSFELD e VELASCO 2006; WU KR et. al. 1997; GIACCIO et. al. 1992).

3.1.3.1 Propriedades do agregado graúdo

O módulo de elasticidade do agregado raramente é determinado, mas isso não significa que ele não seja importante, já que geralmente o módulo de elasticidade do concreto se eleva com o módulo dos agregados que o constituem (NEVILLE, 2016).

Os materiais constituintes do concreto possuem módulo de elasticidade muito diferente do módulo de elasticidade do concreto. Os agregados graúdos têm um módulo variando a partir de 35 GPa e a pasta de cimento a partir 16 GPa. A deformação do concreto provavelmente será um valor intermediário entre o módulo do agregado e o módulo da pasta de cimento (MELO NETO E HELENE, 2002).

A Tabela 3.2 representa os principais tipos de rochas utilizadas como agregados para o concreto e os seus módulos de elasticidade.

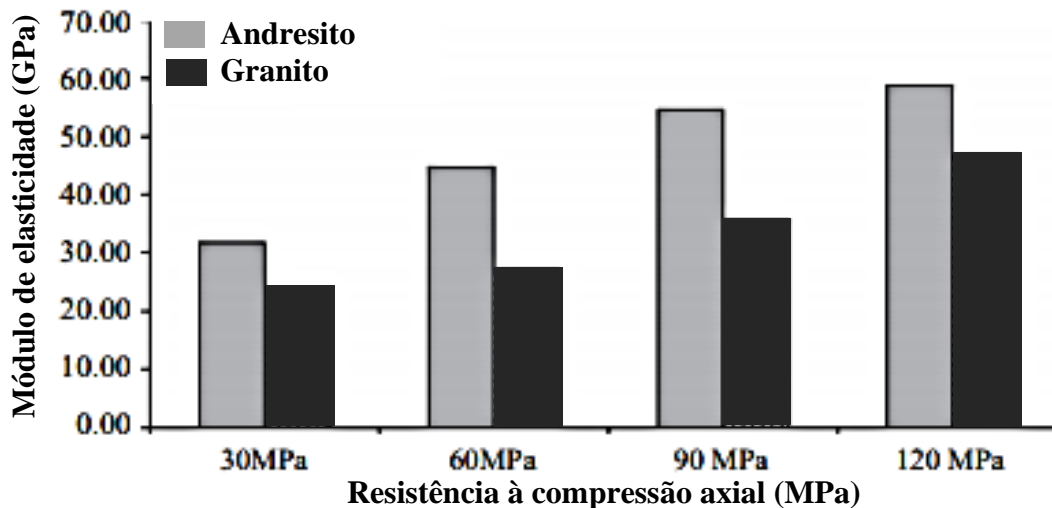
Tabela 3. 2 - Módulo de elasticidade das principais rochas utilizadas como agregados

Tipo de rocha	Módulo de elasticidade (GPa)
Arenito	20-40
Basalto	60-100
Calcário	30-50
Gnaise	40-70
Granito	40-70
Quartzito	50-100
Xisto	25-40

Fonte: Sbrighi, 2005

O módulo de deformação do agregado e seu conteúdo volumétrico dentro da pasta de cimento determinam o valor do módulo de deformação do concreto (BESHR *et. al.*, 2003). Pesquisas realizadas por Beushausen e Dittmer (2015) mostram a influência da rigidez do agregado no módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade, como apresenta a Figura 3.10.

Figura 3. 10- Módulo de elasticidade do concreto com agregados de andesito e granito



Fonte: Adaptado de Beushausen e Dittmer, 2015

Ainda sobre a Figura 3.10, os autores complementam que a tendência mostrada poderia ser explicada por dois fatores: um deles pela melhora na zona de transição ou pela maior rigidez do agregado. A primeira explicação pode ser desconsiderada, uma vez que não foi identificada nenhuma tendência perceptível nos testes de tração, de modo que se pode deduzir que a zona de transição do andesito e do granito é semelhante e, portanto, espera-se que tenham uma rigidez semelhante para ambos os tipos agregados. Como a pasta de cimento foi mantida

constante para ambos os tipos de agregados, propõe-se que a rigidez do andesito e do granito tenha a maior influência na diferença das qualidades elásticas dos diferentes concretos. Para Alexander e Mindess (2005) o módulo de elasticidade do concreto é de fato diretamente proporcional à rigidez da pasta de cimento, do agregado e da zona de transição, e tanto a rigidez da pasta quanto da zona de transição são similares neste trabalho, sendo a rigidez do agregado que influenciou nos resultados.

O efeito da influência do agregado nas propriedades elásticas do concreto também pode ser confirmado pelos trabalhos apresentados por Beushausen e Dittmer (2015), Rashid et al. (2002), Alexander e Mindess (2005), Ahmad e Alghamdi (2012) e Uysal (2012), em que demonstram que a rigidez do agregado tem um impacto direto no módulo de elasticidade do concreto. Na pesquisa desenvolvida por Pacelli de Andrade (1997) se verificou que existe uma grande variação de resistências dentro de um mesmo tipo de agregado graúdo, assim como, o desvio padrão encontrado para cada procedência se apresenta, em muitos casos, bastante elevado.

Como existe variação de resistência à compressão e módulo de elasticidade para diferentes litologias de rochas, a Tabela 3.3 apresenta alguns desses dados.

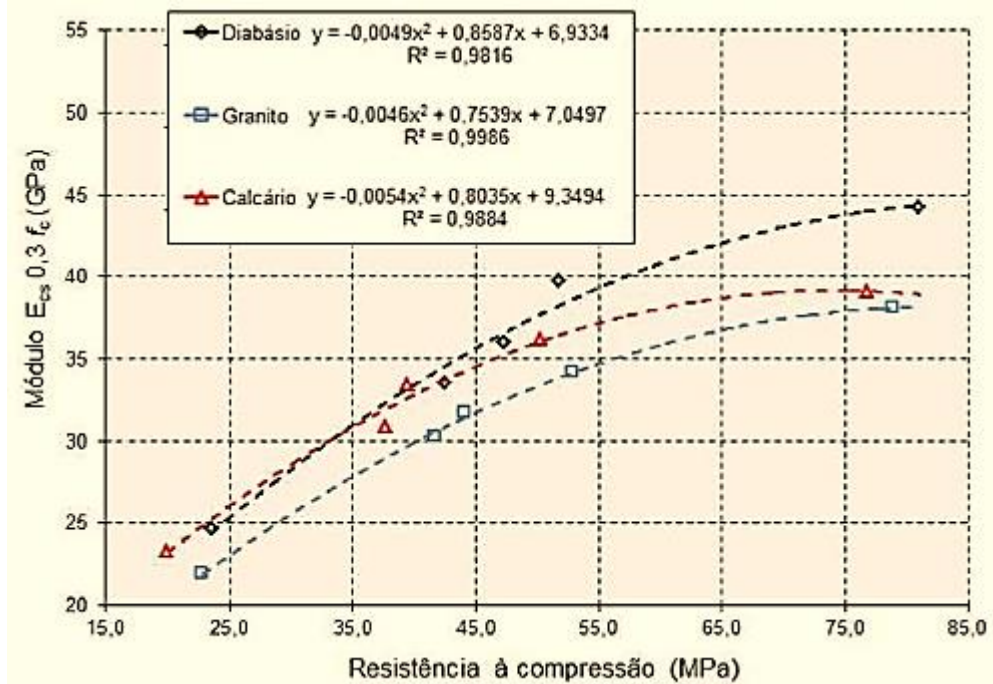
Tabela 3.3 - Propriedades típicas de rochas

Tipo de Rocha	Resistência à compressão (MPa) Média	Absorção (%)	Massa específica (kg/m³)	Módulo de deformação (GPa)
Granito	150	0,1 a 0,8	2600/2700	40/70
Basalto compacto	220	0,1 a 0,6	2750/2950	60/100
Gnaise	150	0,2 a 0,8	2550/2700	40/70
Calcário	120	0,2 a 4,5	2600/2800	30/50
Quartzito	260	0,1 a 0,8	2550/2700	50/100
Arenito	70	1,2 a 8,5	2200/2400	20/40

Fonte: Adaptado de Sbrighi Neto, 2005

Para evidenciar a influência do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto, Bilesky (2016) estudou três litologias diferentes de agregados: granito, diabásio e calcário, conforme a Figura 3.11.

Figura 3. 11 - Influência dos agregados no módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Adaptado de Bilesky, 2016.

Bilesky (2016) inferiu, então, que os concretos produzidos com agregados de diabásio resultaram em valores de módulo de elasticidade superiores aos concretos produzidos com agregados de granito e calcário, para todos os níveis de resistência à compressão, atribuindo esse acontecimento ao módulo de elasticidade das rochas.

Assim como há diferenças entre as várias litologias de rochas, também se observa uma variação expressiva nas propriedades das rochas dentro de uma mesma litologia, características estas que variam conforme a localidade de extração, como pode ser observado na Tabela 3.4.

Tabela 3. 4 - Propriedades de basaltos extraídos de diferentes localidades

Rocha	Origem	Resistência à compressão (MPa) Média	Desvio padrão (MPa)	CV (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio padrão (GPa)	CV (%)
Basalto denso	Marimbondo	128,0	49,6	38,8	69,2	18,1	26,2
Basalto	Itumbiara	115,3	71,8	62,3	61,1	15,8	25,9
Basalto	Itaipu	164,6	58,2	35,4	70,8	9,2	13,0
Basalto	Boa Esperança	181,7	45,4	25,0	99,4	8,9	8,9

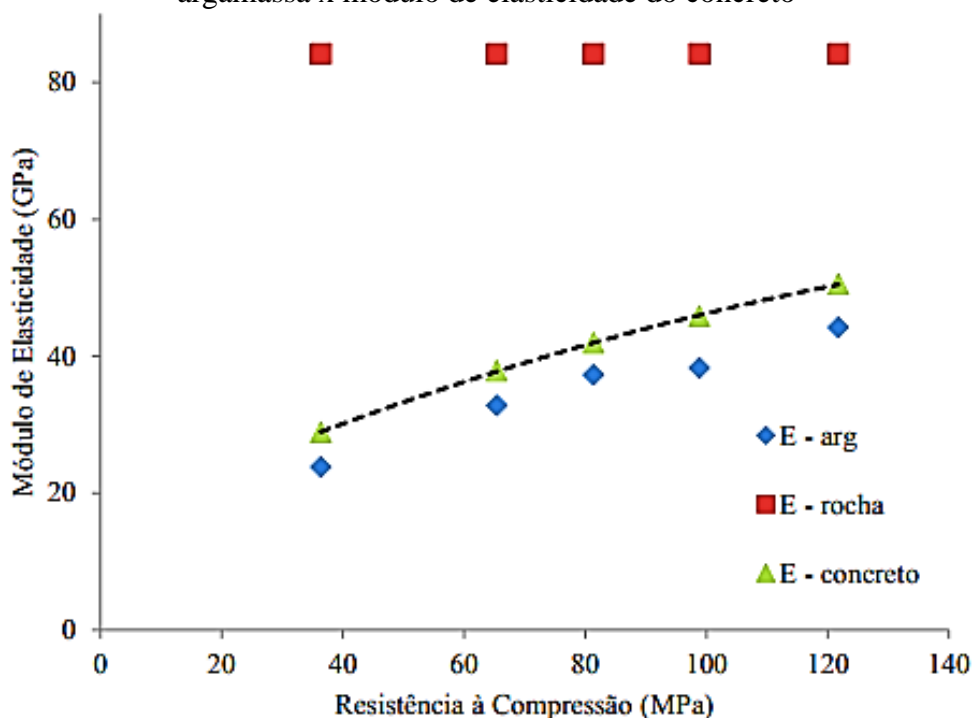
Fonte: Adaptado de Furnas, 1997

Por meio dos dados apresentados na Tabela 3.4, percebe-se que no momento em que se está trabalhando com agregados e objetiva-se verificar a sua influência em uma mistura de concreto, o ideal é identificá-los por meio de suas propriedades, e não pela litologia, pois as mesmas variam conforme a localidade da jazida.

As pesquisas de Wu *et al.* (2001), Beshr *et al.* (2003), Uysal (2012) e Beushausen e Dittmer (2015) também confirmaram as diferenças significativas entre os valores de módulo de elasticidade de concretos produzidos com vários tipos de agregados graúdos e mesma relação a/c, em que o módulo aumentou com o aumento da resistência do concreto ocasionada pelo aumento da rigidez do agregado.

Após realizar ensaios do módulo de elasticidade da rocha, da argamassa e do concreto formado pela mistura dos dois anteriores, Rohden (2015) inferiu que o módulo de elasticidade do concreto é uma ponderação entre o módulo de elasticidade da rocha e o módulo da argamassa, Figura 3.12.

Figura 3. 12 - Módulo de elasticidade do agregado graúdo x módulo de elasticidade da argamassa x módulo de elasticidade do concreto

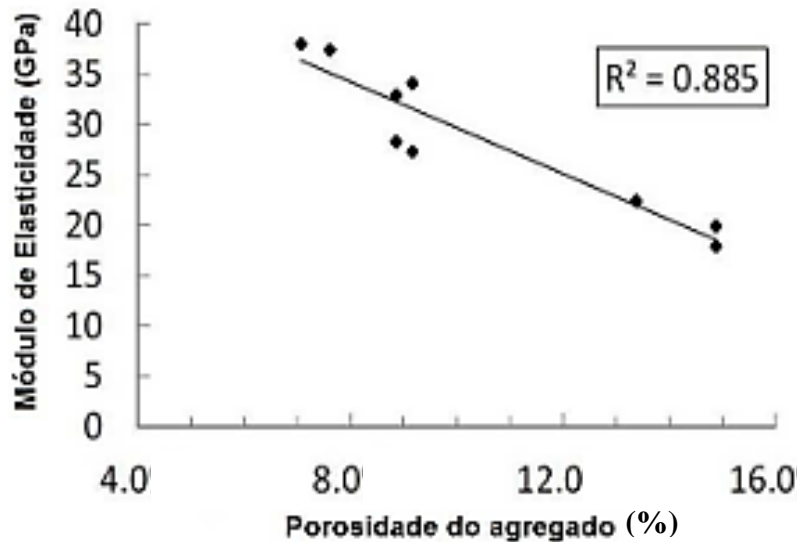


Fonte: Adaptado de Rohden, 2015

Apesar de a variação da porosidade dos agregados não afetar de forma significativa a resistência à compressão do concreto, ela influencia o valor do módulo de elasticidade do mesmo, principalmente em concretos com baixa e média resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Dessa forma pode-se inferir que a maneira como uma variável interfere na resistência

do concreto pode ser diferente de como ela afeta o módulo do mesmo, sendo uma das explicações da complexidade de se encontrar um modelo geral de previsão do módulo que correlacione o módulo de elasticidade com a resistência à compressão. Contudo, quanto maior a porosidade de um agregado, menor será a sua rigidez e, conseqüentemente, menor será a rigidez do concreto final obtido, Figura 3.13.

Figura 3. 13- Porosidade do agregado x módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Adaptado de Gudmundsson, 2013

Pesquisas com diferentes rochas demonstram que o módulo de elasticidade de agregados de baixa porosidade, como granito, rochas vulcânicas e basalto, encontram-se na faixa de 70 a 140 GPa, já em arenitos, calcários e cascalhos de variedades porosas, as faixas variam de 24 a 49 GPa. Dessa forma, pode-se inferir que agregados leves são altamente porosos. A depender da porosidade, o módulo de elasticidade de um agregado leve pode ser de apenas 7 GPa e chegar a 28 GPa. Sendo assim, o módulo de elasticidade do concreto é afetado, podendo variar de 14 a 24 GPa, ficando entre 50 a 75% do módulo para concretos de densidade normal (MEHTA E MONTEIRO, 2006). Pesquisas realizadas por Santos *et al.* (2017) demonstraram que os agregados de origem sedimentar, mais porosos, apresentaram menor capacidade de restringir as deformações.

As rochas utilizadas na produção do concreto possuem características variadas, as quais influenciam diretamente nas propriedades do mesmo (Gidrão, 2015; Beushausen e Dittmer, 2015; Bilesky, 2016; Santos *et al.*, 2017 e Tibbetts *et al.*, 2018).

Na pesquisa de De Marchi *et al.* (2010), verificou-se que a elevação do abatimento do concreto pelo tronco de cone, considerando apenas a adição de água, ocasionou conseqüentemente o aumento no consumo de cimento Portland (para manter a relação

água/cimento) e do volume de pasta, reduzindo, assim, o valor do módulo, fazendo-se o uso de dois diferentes agregados graúdos e três níveis de resistência à compressão, conforme apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6.

Tabela 3. 5- Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade do concreto com agregado de basalto

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

Fonte: Adaptado de De Marchi *et al.*, 2010

Tabela 3. 6- Influência do volume de pasta no módulo de elasticidade do concreto com agregado de granito

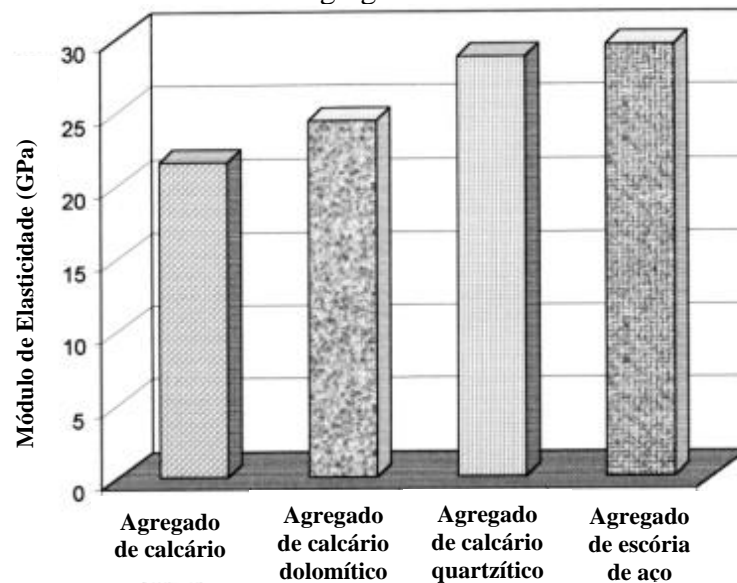
f_{ck} (MPa)	$f_{c,28}$ (MPa)	$E_{cs,28}$ (GPa)	a/c	Abatimento pelo tronco de cone (mm)	m (kg)	Consumo de cimento (kg/m ³)	Volume de pasta (l/m ³)
30	37,3	26,8	0,575	80	6,0	308	280
	37,7	24,9	0,590	125	5,7	317	293
	36,8	23,8	0,576	165	5,1	342	311
35	45,4	29,0	0,492	85	4,8	370	305
	44,7	27,1	0,500	125	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

Fonte: Adaptado de De Marchi *et al.*, 2010

Com os resultados apresentados nas Tabelas 3.5 e 3.6, pode-se perceber que mantendo as mesmas resistências características à compressão para os dois tipos de agregados, ocorre variação no valor do módulo de elasticidade do concreto, permitindo, assim, inferir sobre a influência do tipo de agregado sobre o módulo de elasticidade do mesmo.

Na Figura 3.14 percebe-se que o menor módulo de elasticidade foi obtido com concretos produzidos com agregados de calcário, seguido por calcário dolomítico e quartzítico, em que o maior valor foi encontrado com agregado de escória de aço. Vale frisar que para todas as misturas foram mantidas as mesmas proporções de materias e mesma relação água/cimento.

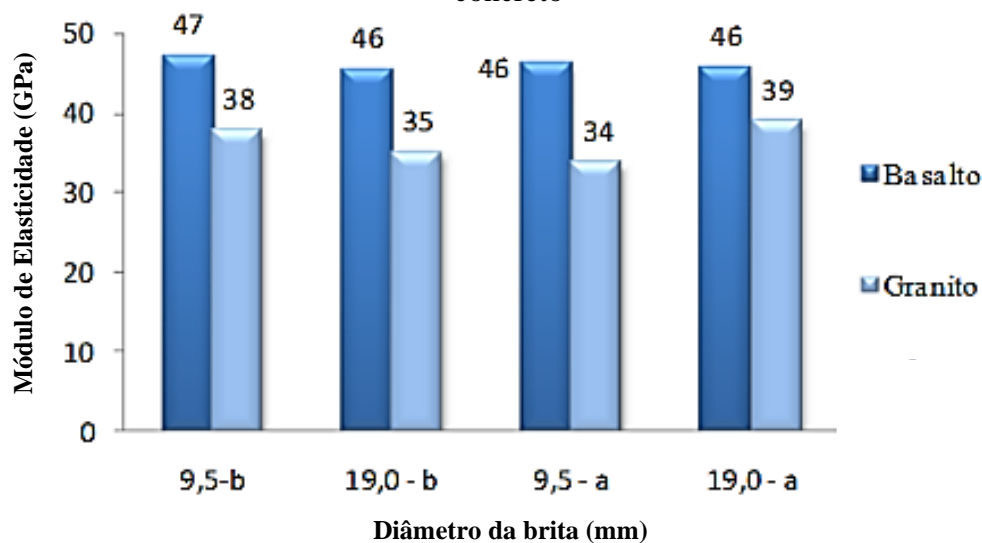
Figura 3. 14 - Módulo de elasticidade do concreto preparado com diferentes tipos de agregados



Fonte: Adaptado de Beshr *et. al.*, 2003

O tipo e as características do agregado graúdo influenciam significativamente no módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland. Neto *et al.* (2011) estudaram a influência da natureza do agregado sobre o módulo de elasticidade do concreto e concluíram que o mesmo é fortemente influenciado pelo tipo de agregado graúdo, ou seja, por suas propriedades mecânicas, sendo maior para o basalto, Figura 3.15.

Figura 3. 15 - Influência da natureza do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto



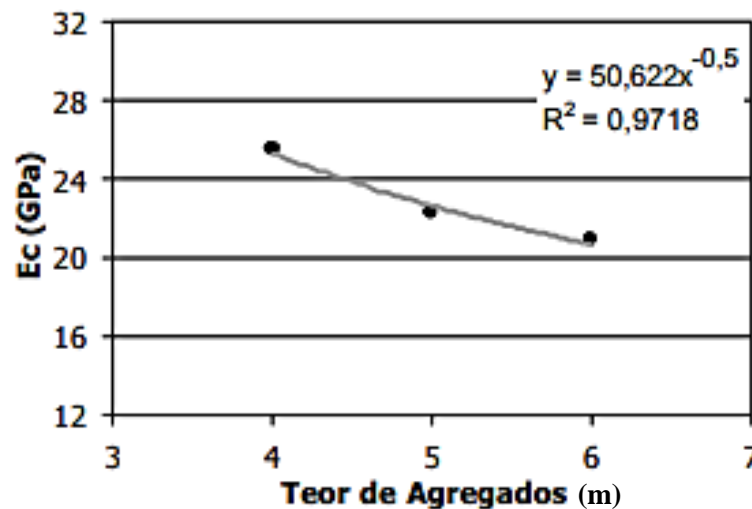
a = Teor alto de brita, $m=3,03$ (m - relação agregados secos/cimento em massa)
 b= Teor baixo de brita, $m=2,67$

Fonte: Adaptado de Neto *et al.*, 2011.

3.1.3.2 Teor de agregado graúdo

O módulo de elasticidade do concreto é fortemente influenciado pelo volume de agregado graúdo que contém na mistura. Melo Neto e Helene (2002) mostram a influência do teor de agregado no módulo de elasticidade do concreto, a Figura 3.16 apresenta essa situação.

Figura 3. 16- Teor de agregado x módulo de elasticidade do concreto com abatimento constante e relação a/c variável



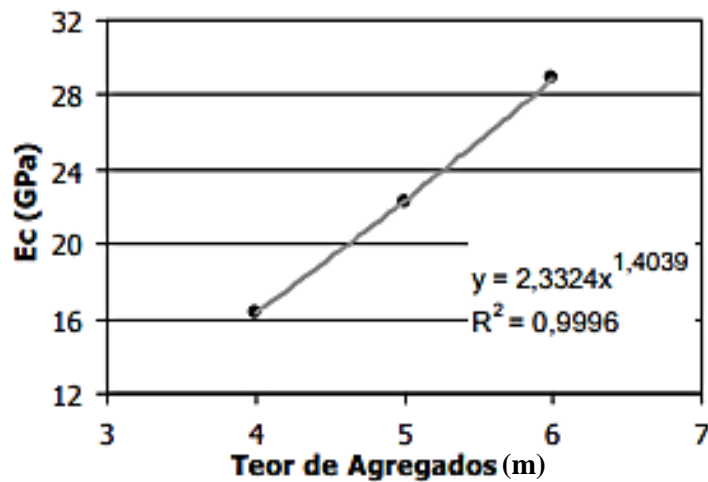
(m - relação agregados secos/cimento em massa).

Fonte: Adaptado de Melo Neto e Helene, 2002

Na Figura 3.16 percebe-se que ocorre uma diminuição do módulo de elasticidade quando se aumenta o teor de agregados e mantém-se o abatimento constante, em função do aumento do teor de água da mistura. A justificativa para esse acontecimento pode ser dada de acordo com Monteiro e Helene (1993), em que o aumento do teor de agregados tem o efeito positivo para o módulo, prejudicado com o aumento da relação a/c, para que se mantenha o abatimento constante, o que resulta em uma pasta de cimento mais fraca e, conseqüentemente, diminui-se o módulo.

Ainda, Melo Neto e Helene (2002) apresentam uma situação inversa, em que a relação a/c é mantida constante e aumenta-se o teor de agregado (Figura 3.17).

Figura 3. 17- Módulo de elasticidade x teor de agregado com relação a/c constante

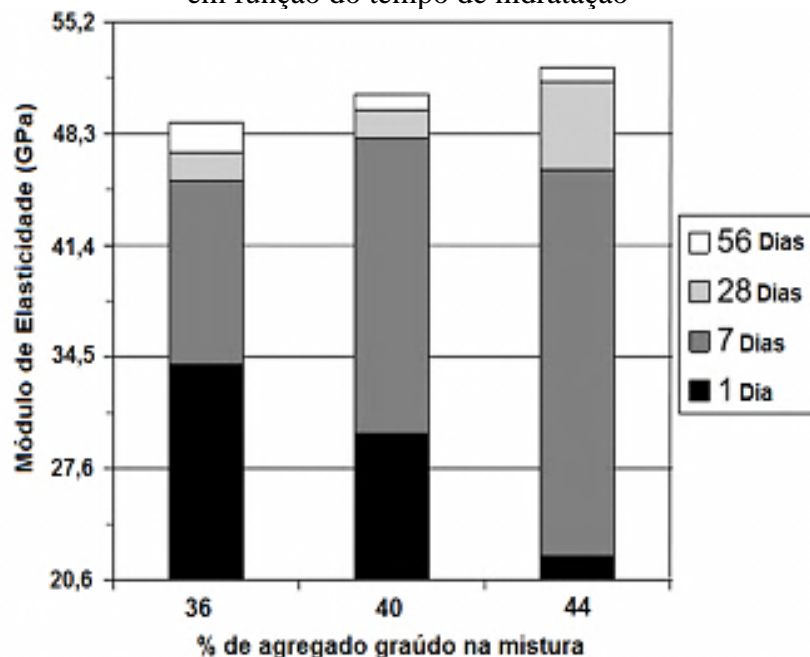


(m - relação agregados secos/cimento em massa)

Fonte: Adaptado de Melo Neto e Helene, 2002

Conforme a Figura 3.17, ocorre um aumento do módulo devido a maior quantidade de agregados graúdos, que possuem módulo de elasticidade maior do que o da pasta de cimento. Essa mesma constatação foi verificada por Myers (2008), porém na idade de 1 dia do concreto observou-se uma redução do módulo de elasticidade do concreto com o aumento do teor de agregado graúdo, que pode ser explicada pela menor quantidade de pasta hidratada e sua resistência, Figura 3.18.

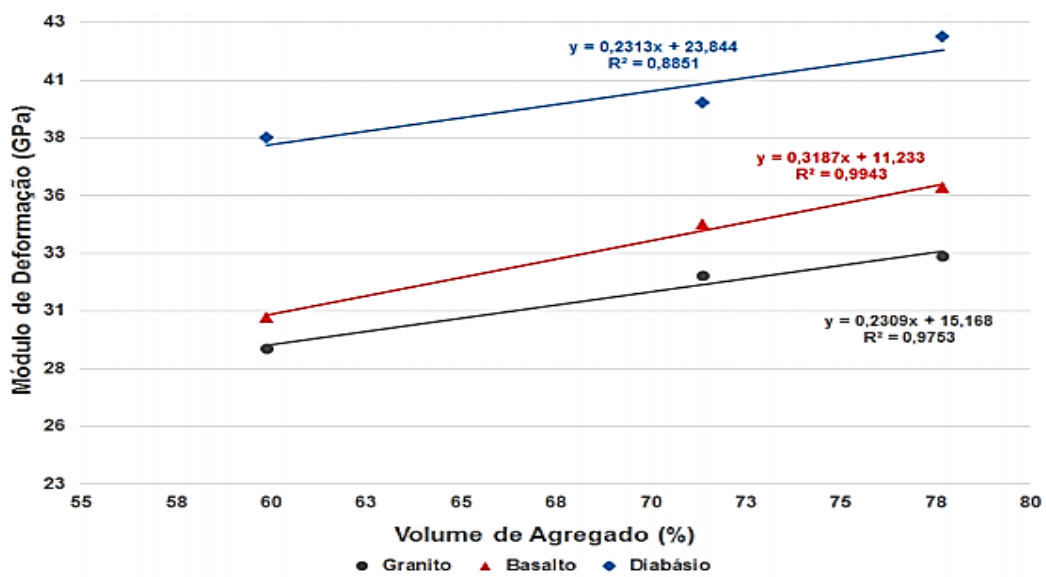
Figura 3. 18 - Influência do teor de agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto em função do tempo de hidratação



Fonte: Adaptado de Myers, 2008

Ao utilizar relação água/cimento e teor de argamassa fixos, Girardi (2018) constatou, por meio de equações de regressão para diferentes idades do concreto (14, 28 e 150 dias), que o comportamento entre o volume de agregado e o módulo de deformação é praticamente linear, em cada uma das três diferentes rochas estudadas (granito, basalto e diabásio). Dessa forma, o aumento no volume de agregado na mistura ocasiona uma elevação no valor do módulo do concreto. A Figura 3.19, para a idade de 150 dias do concreto representa esse acontecimento para as demais idades, considerando a semelhança entre as mesmas.

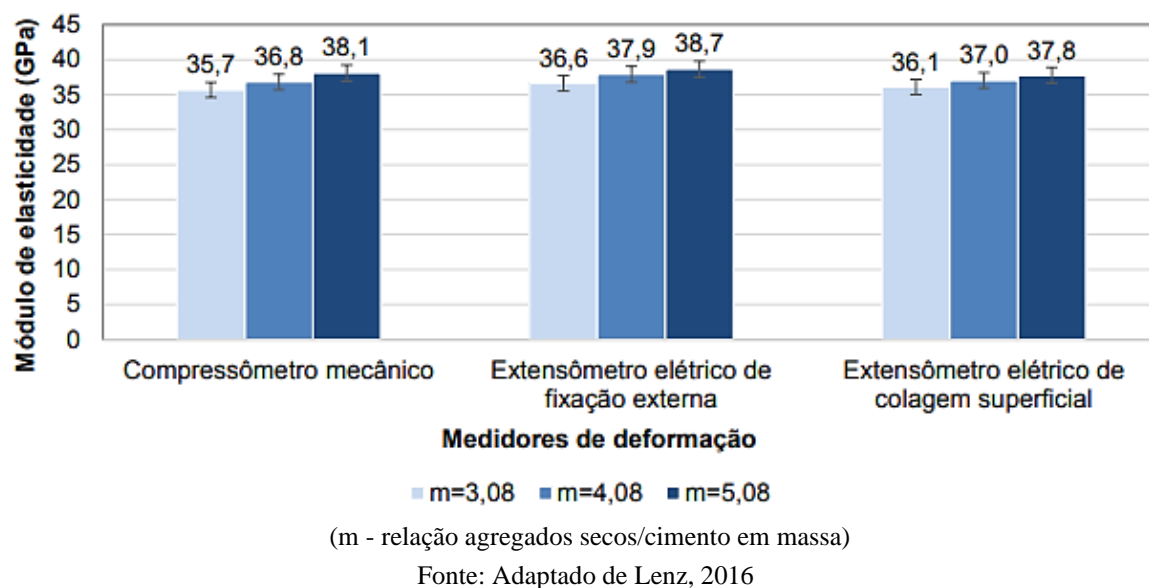
Figura 3. 19 - Regressão para o módulo de deformação do concreto, aos 150 dias, em função do volume de agregado



Fonte: Adaptado de Girardi, 2018

O aumento do módulo de elasticidade do concreto em razão da maior quantidade de agregado na mistura também foi verificado por Lenz (2016) para todos os tipos de equipamentos de medida estudados, em que foram mantidas constantes as relações água/cimento e o abatimento do concreto, Figura 3.20.

Figura 3. 20 - Módulo de elasticidade em função do aumento do teor de agregados (m) dos concretos aos 28 dias

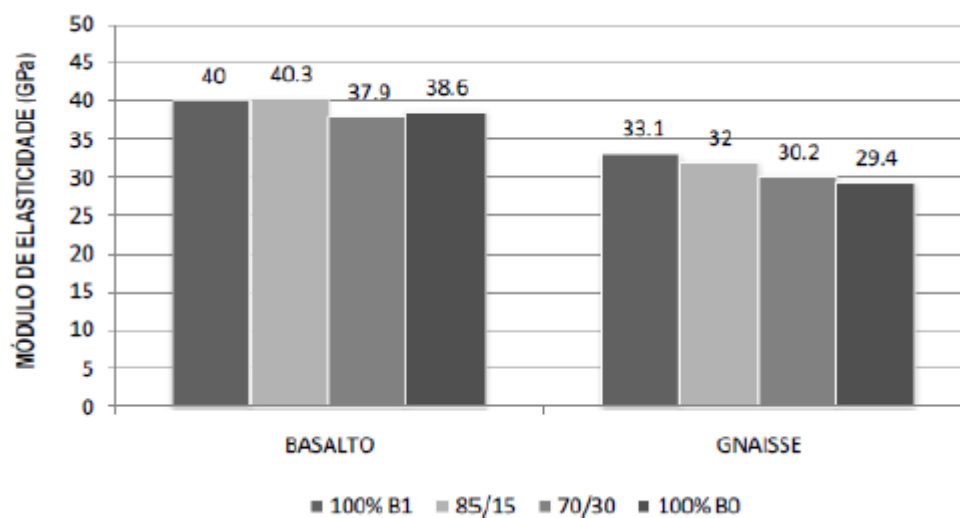


3.1.3.4 Dimensão máxima do agregado

A influência da dimensão máxima característica do agregado sobre o módulo de elasticidade do concreto é evidente, pois o seu aumento reduz a superfície específica, diminuindo, conseqüentemente, a demanda de água na mistura, conduzindo, assim, a uma matriz mais resistente e menos deformável.

Gagliardo *et al.* (2010), pesquisando sobre agregados de mesma mineralogia e módulo de elasticidade para concretos, verificaram uma variação nos valores do módulo de elasticidade em função das diferentes proporções adotadas para cada dimensão máxima de agregado, Figura 3.21.

Figura 3. 21- Influência da mineralogia e tamanho do agregado no módulo de elasticidade

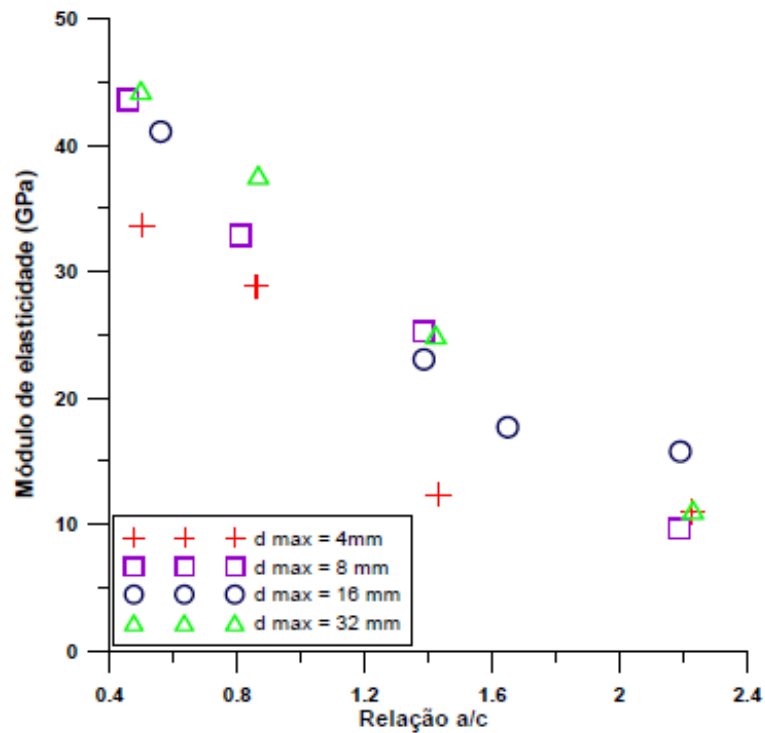


Fonte: Gagliardo et al., 2010

Ainda sobre a Figura 3.21, observa-se um incremento do valor do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com agregados de maior dimensão máxima (brita 1) em relação aos concretos produzidos com agregados com menor dimensão máxima (brita 0).

A relação da dimensão máxima do agregado com o módulo de elasticidade do concreto também é apresentada por Yildirim e Sengul (2011), quando concluíram que, aparentemente, a redução da dimensão máxima do agregado de 32 mm para 16 mm ou 8 mm não afetou substancialmente o módulo de elasticidade do concreto (Figura 3.22). Já as misturas com dimensão máxima do agregado de 4 mm reduziram o valor do módulo. No entanto, é possível inferir que para um mesmo volume de conteúdo de agregado, a diminuição da dimensão máxima aumenta a superfície total dos agregados, levando conseqüentemente ao aumento da área de interface cimento-agregado, que é o elo fraco do concreto, e que conseqüentemente pode conduzir a um módulo de elasticidade do concreto menor. Ainda, pode-se afirmar que o processo de cominuição pode gerar microfissuras na superfície do agregado, sendo mais expressivo em agregados menores.

Figura 3. 22- Módulo de elasticidade do concreto para diferentes dimensões máximas de agregado



Fonte: Adaptado de Yildirim e Sengul, 2011

A influência das propriedades dos agregados sobre o concreto também foi estudada por Pereira Neto e Djanikian (1996), que analisaram diferentes agregados e obtiveram resultados variados para os mesmos. Com idade de 28 dias, o módulo de elasticidade do concreto apresentou instabilidade para os agregados de granito e calcário ao variar a dimensão máxima característica do agregado, uma leve tendência de aumento em agregados de basalto, e uma elevação do módulo com agregados de gnaisse e diabásio, sendo que essa diferença se mantém para idades maiores, como 56 dias (Tabela 3.7).

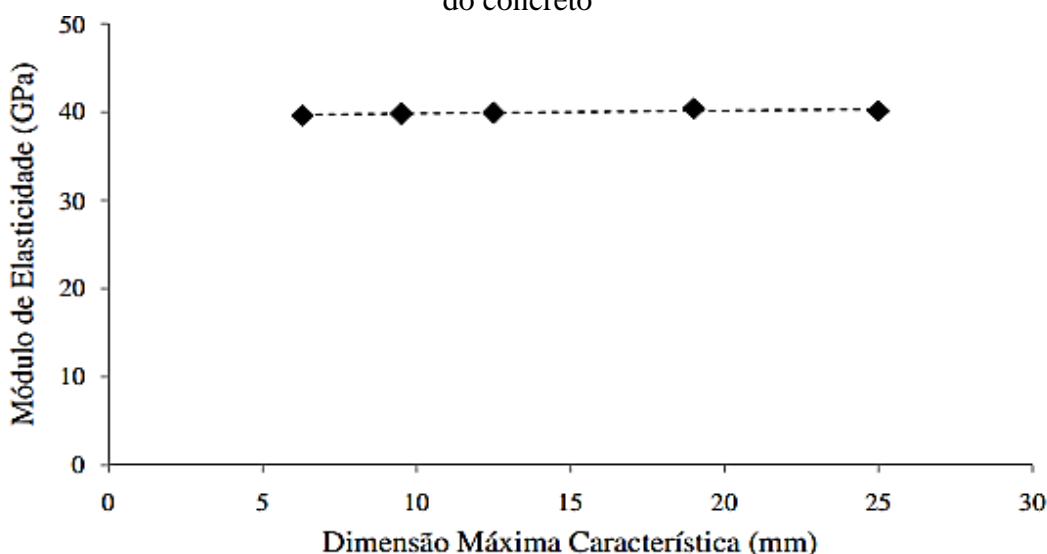
Tabela 3. 7 -Influência do tipo e da dimensão máxima do agregado no módulo de elasticidade do concreto

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

Fonte: Adaptado de Pereira Neto e Djanikian, 1996.

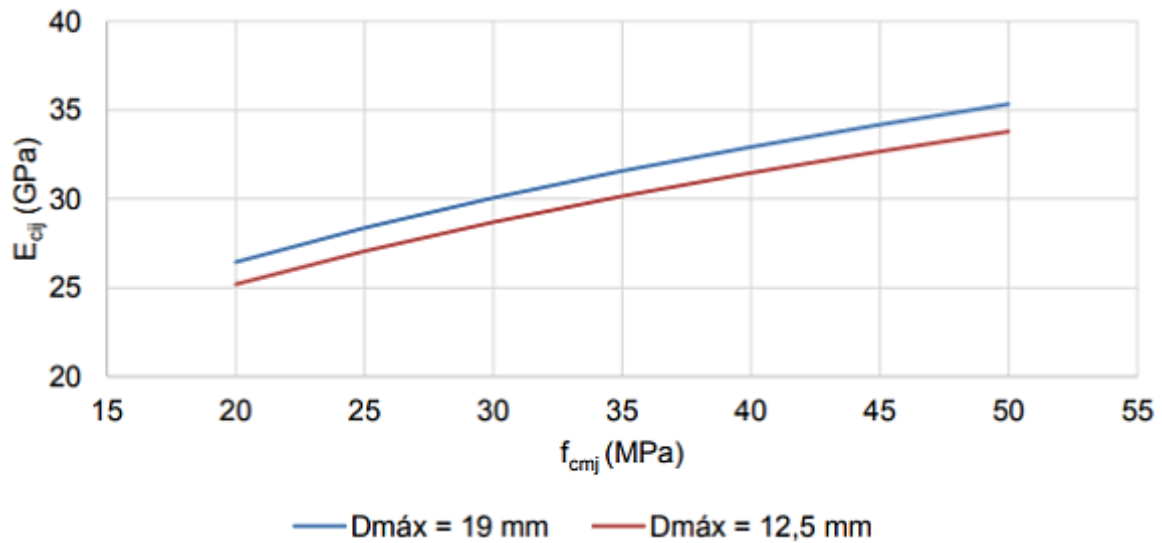
Pesquisas realizadas por Rohden (2011) não evidenciaram a influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo como estatisticamente significativa para o módulo de elasticidade do concreto, Figura 3.23. Kummer (2018) também chegou à conclusão semelhante, ou seja, em sua pesquisa a dimensão máxima do agregado graúdo pouco influenciou no módulo de elasticidade do concreto (Figura 3.24).

Figura 3. 23 - Dimensão máxima característica do agregado graúdo x módulo de elasticidade do concreto



Fonte: Adaptado de Rohden, 2011.

Figura 3. 24 - Influência da dimensão máxima característica do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto



f_{cmj} = Resistência de dosagem do concreto à j dias
 E_{cij} = Módulo de elasticidade tangente inicial do concreto à j dias

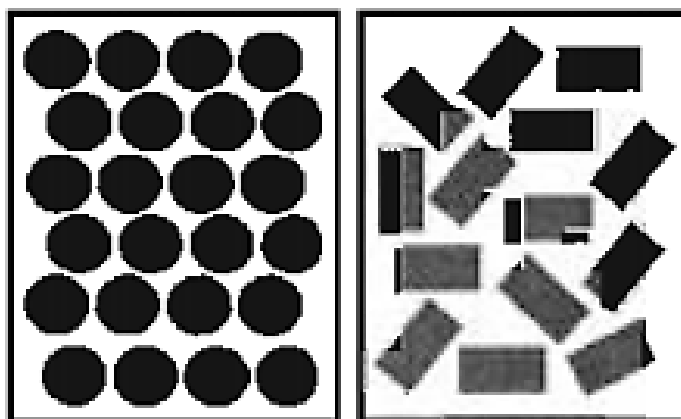
Fonte: Adaptado de Kummer, 2016.

3.1.3.5 Índice de forma do agregado graúdo

O índice de forma do agregado graúdo exerce bastante influência nas propriedades do concreto, no entanto, são poucas pesquisas encontradas na literatura que estudam essa influência do agregado no módulo de elasticidade do concreto. Esse índice permite avaliar a qualidade do agregado graúdo em relação à forma dos grãos. Considera-se que os agregados com grãos de forma cúbica, tida como forma ótima para agregados britados, possuem índice próximo de 1; os grãos lamelares apresentaram valores bem mais altos, sendo considerado aceitável o limite de 3. O índice se baseia na medida da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, conforme a NBR 7809 (ABNT, 2019).

A forma dos grãos afeta o empacotamento dos agregados (OLIVEIRA *et al.*, 2000; MENDES, 2008). Para as partículas que possuem dimensões similares, ou seja, monodispersas, quanto maior for o arredondamento das partículas, maior será o empacotamento do conjunto granular (Figura 3.25). As partículas lamelares ou alongadas acabam prejudicando este empacotamento e criando vazios, o que faz com que os concretos sejam menos econômicos, em virtude do maior volume de pasta de cimento necessária para preencher os vazios deixados pelos agregados.

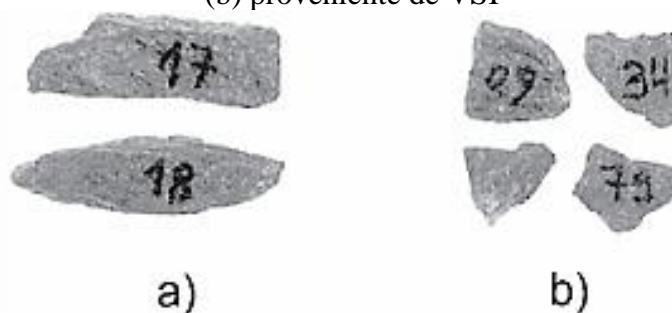
Figura 3. 25 - Forma das partículas e o índice de vazios



Fonte: Adaptado de Oliveira et. al., 2000.

Dessa maneira, uma alternativa para beneficiar o agregado graúdo é a utilização de britadores de eixo vertical - VSI (*vertical shaft impact*), investimento este que vem sendo realizado pelas pedreiras para aumentar a produção e melhorar a qualidade dos seus agregados. Esse tipo de britador realiza a cominuição autógena do material, melhorando o formato dos grãos dos agregados, Figura 3.26 (HICKEL et. al., 2018).

Figura 3. 26 - Forma de agregados graúdos de origem basáltica (a) com britadores tipo cônico (b) proveniente de VSI



Fonte: Adaptado de Wedmann, 2008.

Contudo, existem poucos estudos sobre a influência dos britadores na forma dos grãos para os agregados.

Silva *et. al.* (2017) estudaram quatro formas de agregados graúdos (cúbica, alongada, lamelar e alongada-lamelar), que possuem como índice de forma a classificação, realizada com base na norma NBR 7809 (ABNT, 2019) e demais estudos, que é mostrada na Tabela 3.8.

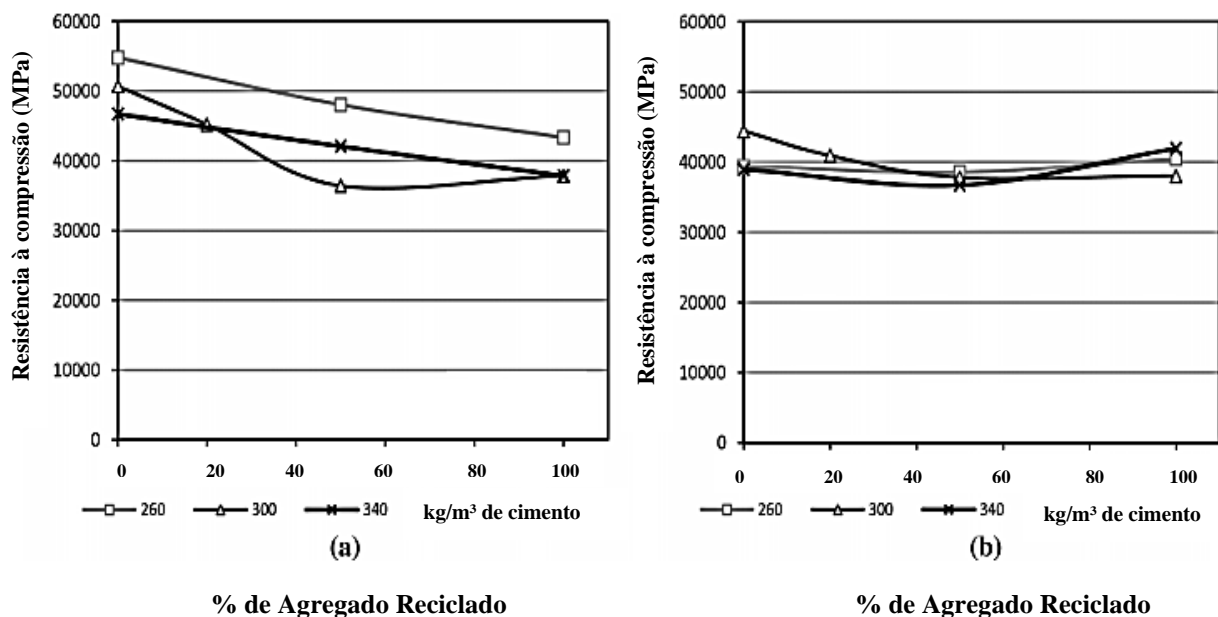
Tabela 3. 8 - Determinação do índice de forma

Forma	Razão	Índice
Cúbica	$c/e < e/l/e <$	1,8
Alongada	$c/e > e/l/e <$	1,8
Lamelar	$c/e > e/l/e >$	2,4
Alongada-Lamelar	$c/e > e/l/e >$	3,0

c- comprimento; e- espessura; l- largura

Fonte: Silva *et. al.*, 2017.

A partir das diversas misturas de concreto, Silva *et. al.* (2017) puderam concluir que os concretos produzidos com agregados graúdos irregulares apresentaram maiores níveis de deformações em relação aos concretos com agregado cúbico e alongado. Laserna e Montero (2016) avaliaram a influência da forma do agregado graúdo reciclado no módulo de elasticidade do concreto, comparando agregados britados e agregados arredondados (Figura 3.27 – a e b, respectivamente), fazendo o uso de diferentes consumos de cimentos e porcentagens de agregado reciclado. Dessa forma, foi possível constatar que o processo de arredondamento em detrimento ao processo de britagem dos grãos de agregados graúdos produz concretos com módulo de elasticidade inferiores, porém semelhantes para os diferentes consumos de cimentos e volumes de agregados.

Figura 3. 27 - E_c do concreto com agregados reciclados britados (a) e arredondados (b)

Fonte: Adaptado de Laserna e Montero, 2016

A influência da forma do agregado graúdo sobre a resistência à compressão do concreto foi estudada por Arndt *et al.* (2007), em que foram utilizados dois tipos de agregados graúdos, ambos da mesma central de britagem, sendo diferenciados pelo processo de britagem, um britador de mandíbula, que produziu grãos mais lamelares, e um beneficiado por britador de impacto de eixo vertical (VSI) que confere ao grão maior esfericidade. Não se priorizou a relação água/cimento, e dessa forma fez-se a adição de água até que se atingisse o abatimento desejado. Os resultados evidenciaram que os concretos produzidos com agregados lamelares (índice de forma=4) demandaram mais água para atingir o abatimento desejado que os concretos com agregados mais cúbicos (índice de forma= 1,8), dessa maneira, os resultados de resistência à compressão do concreto foram em média 10% menores para os concretos com agregados lamelares, quando comparados aos concretos com agregados mais cúbicos. Essa influência ocorreu de maneira indireta, pela alteração no teor de argamassa e umidade do concreto. O módulo de elasticidade do concreto não foi investigado pelos autores.

3.2 PARÂMETROS DE ENSAIO

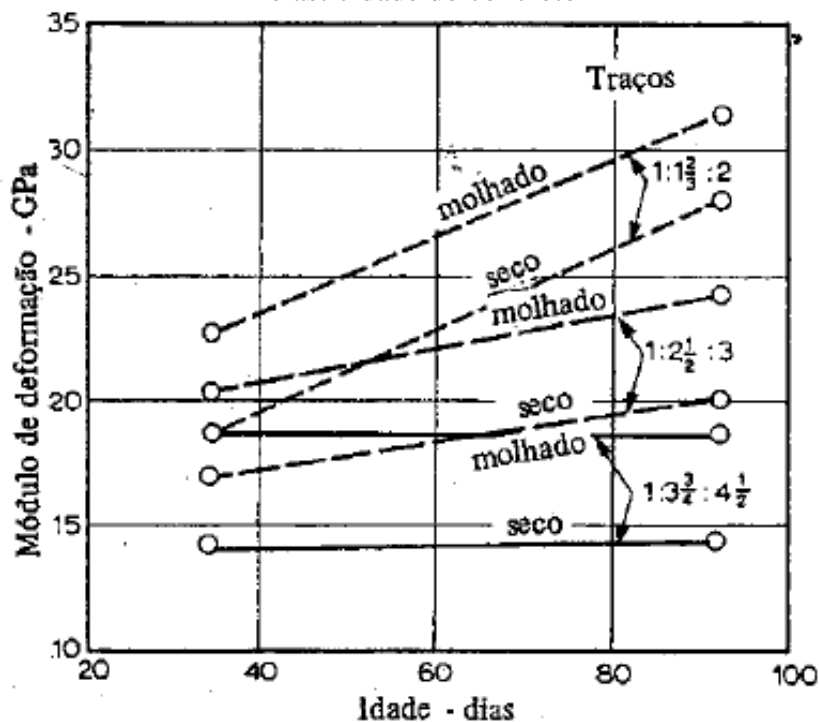
O módulo de elasticidade depende da composição do concreto, e também da cura, principalmente nas primeiras horas e dias após a moldagem. Han e Kim (2014) e Safiuddin e Raman (2015) afirmam que um componente bastante importante da cura é manter a temperatura correta (23 ± 2) °C, já que a mesma, em níveis muito baixos ou muito altos, podem causar impactos negativos às propriedades do concreto. Neste mesmo sentido, o teor de umidade do concreto tem grande influência nas suas propriedades, principalmente nos primeiros estágios e endurecimento. Se o concreto é moldado em temperaturas ambientais extremas, é necessário administrar a cura adequada (SHOUKRY *et al.* 2011; LIU *et al.* 2014).

Se a superfície do concreto não estiver protegida da evaporação da água, pode ocorrer um grande risco de microfissuras se formando não apenas na superfície, mas também dentro do concreto. Uma rápida perda de água do concreto, especialmente durante as primeiras horas, tem uma influência crítica na hidratação do cimento. Isso pode resultar em uma grande magnitude de retração, que é geralmente a primeira causa de microfissuras que se formam na estrutura interna do concreto (MASLEHUDDIN *et al.*, 2013). Se esses defeitos microscópicos ocorrerem, o desenvolvimento das propriedades mecânicas do concreto será irreversivelmente afetado durante todo o tempo de seu envelhecimento. Constatou-se também que, além do método e da qualidade de cura, o tempo de cura também afeta os valores finais das propriedades do concreto, incluindo o módulo de elasticidade (UDDIN *et al.*, 2013).

O efeito do teor de umidade no módulo de elasticidade do concreto já foi analisado há muito tempo atrás. No início do ano de 1929, Davis e Troxell (1929) relataram que o módulo de elasticidade do concreto foi de 12 a 30% maior para concretos saturados do que para concretos secos. Já na década de 1960, o pesquisador Johnston (1967) evidenciou uma diminuição no módulo quando utilizou secagem ao ar e secagem ao forno do concreto. Cook (1969) também obteve mudanças nos resultados de módulo com concretos submetidos a diferentes tipos de exposição à umidade, em que houve diminuição de 32% do módulo com a diminuição da umidade relativa de 100% para 30%.

Na condição de concreto endurecido, os corpos de prova ensaiados úmidos apresentam, de acordo com Mehta e Monteiro (1994), valores de módulo de deformação aproximadamente 15% maiores que os corpos de prova testados em condições secas. Para Neville (1997) e Wang, Li (2006) o corpo de prova molhado também apresenta maiores módulos de elasticidade do que seco (Figura 3.28).

Figura 3. 28- Influência da condição de umidade do corpo de prova sobre o módulo de elasticidade do concreto



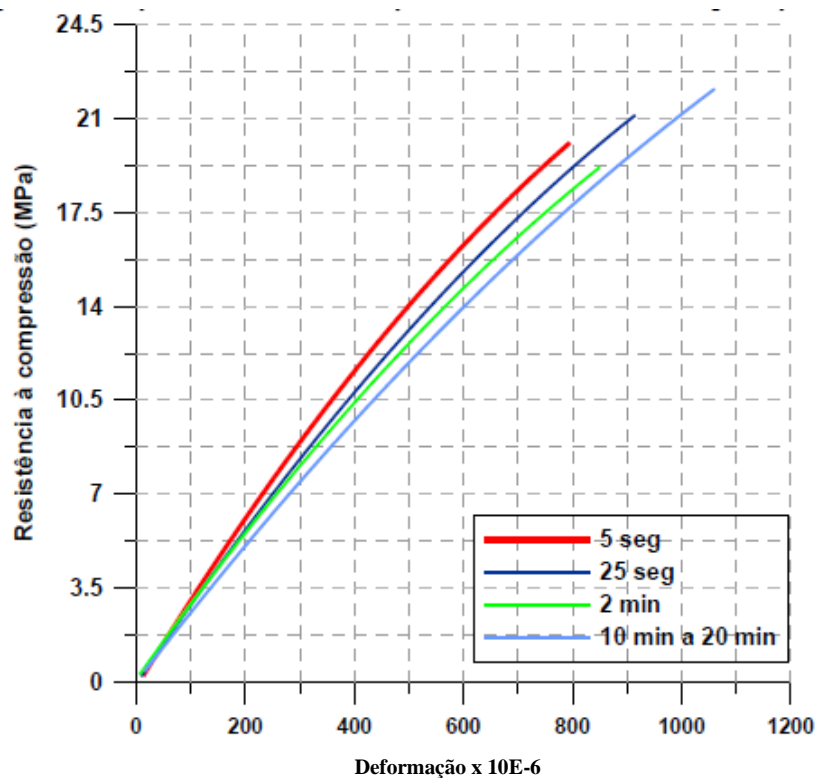
Fonte: Neville, 1997

Ainda de acordo com Neville (1997), o aumento da deformação, ou parte dela, durante o tempo longo de carga é devido à fluência do concreto e, de maneira oposta, quando a carga é aplicada muito rapidamente as deformações observadas são reduzidas enormemente. Outro fator que influencia no valor do módulo de elasticidade é a velocidade de carregamento que o

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

A uniformidade da velocidade da carga está diretamente ligada à uniformidade dos resultados do módulo de deformação, isso porque, o concreto não é um material perfeitamente elástico. Estudos realizados por Andrade (1997) mostram que quanto mais rápida a aplicação da carga, menor a capacidade de propagação das fissuras e acomodação microestrutural das deformações. A Figura 3.29 apresenta o resultado desse estudo da relação entre a tensão e a deformação com velocidade de carregamento, onde se observa que a tendência é reduzir a deformação com a velocidade de carregamento.

Figura 3. 29- Variação da tensão x deformação com a velocidade de carga



Fonte: Adaptado de Andrade, 1997

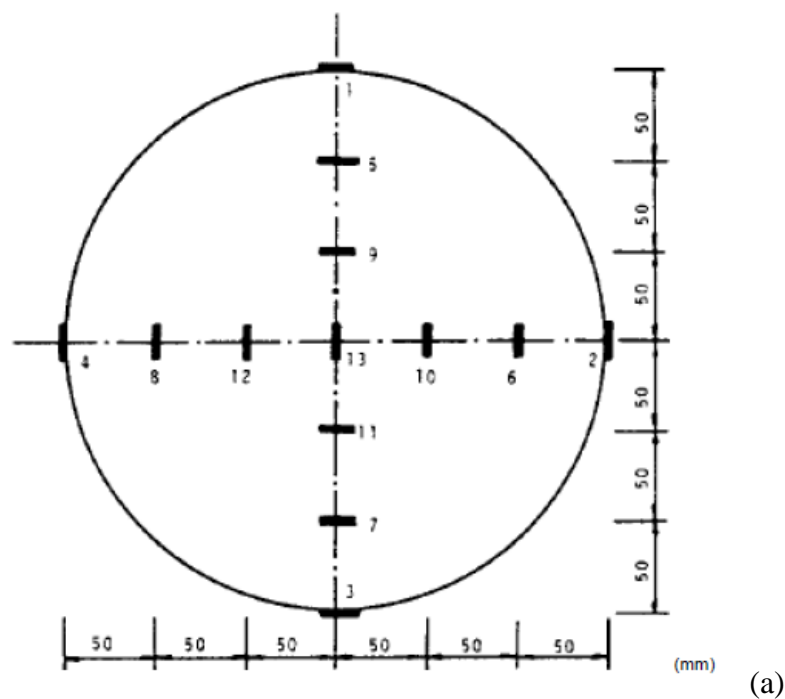
Mehta e Monteiro (1994) afirmam que quanto maior a velocidade de carregamento, maior será a resistência obtida, ainda que para os padrões das velocidades das normas internacionais que preveem ensaios de resistência com duração na ordem de 2 a 3 minutos, esta diferença não passa de 12%.

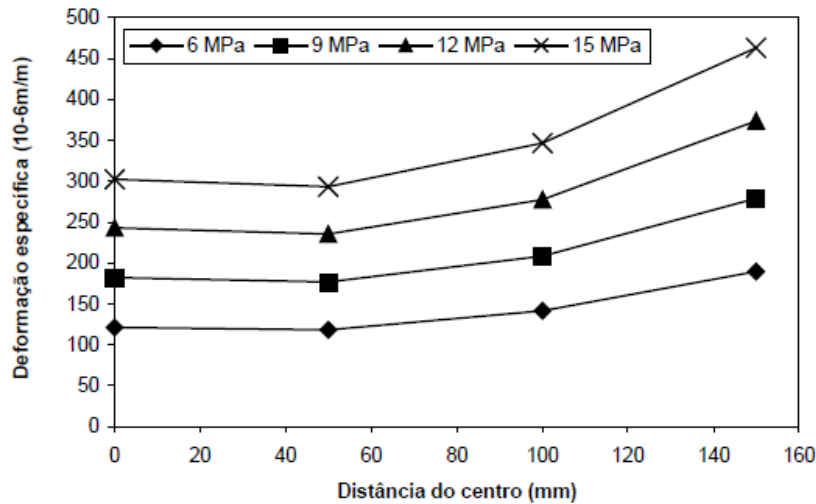
Os instrumentos ou dispositivos de medição das deformações e as técnicas de operação utilizadas durante a execução do ensaio, ou seja, os procedimentos de medição das deformações podem ser fatores geradores de variabilidade. As incertezas mais comuns

residem no poder de captação das deformações de cada sistema e sua técnica e nas dificuldades de instalação de cada sistema sobre os corpos de prova. Conforme Demarchi (2011), a variabilidade para o resultado do módulo de elasticidade encontrado por diversos autores advém de vários fatores, entre eles destaca-se o tipo de instrumentação utilizado para a medição das deformações, visto que o erro da deformação está embutido no denominador da equação para a determinação do módulo de elasticidade e , conseqüentemente, altera o seu resultado.

Para realizar a determinação do módulo de elasticidade, Klink (1975) estudou diversos experimentos de acordo com o método proposto na ASTM C-469. Os procedimentos se deram pela instalação de medidores de deformação em várias regiões dos corpos-de-prova, onde os extensômetros embutidos foram localizados no centro de cada corpo de prova e a 50 mm e 100 mm do centro, além dos extensômetros que foram colados na superfície. Acreditou-se que durante o ensaio as seções transversais não teriam permanecido planas, pois havia nítido crescimento das deformações do centro para a superfície, que implicava em queda de 55% dos resultados de módulo de deformação quantificados, como pode ser visualizado nas Figuras 3.30 (a) e (b), respectivamente.

Figura 3. 30- (a) estudo da distribuição dos instrumentos de medição das deformações no corpo-de-prova. (b) deformação medida para 4 níveis de solicitação





(b)

Fonte: Klink, 1975

Os autores Torrenti, Boulay e Puch (1994) e Brandt (1995) discordaram de Klink pelas seguintes situações:

- Klink não teria preparado corretamente a superfície dos corpos-de-prova, o que poderia ter sido o motivo do acréscimo de deformação em até 100% quando comparada a de superfícies bem preparadas;

- a cura não teria ocorrido como deveria, causando retração por secagem principalmente nas zonas próximas das superfícies das amostras, aumentando a fissuração e deformação nessa região;

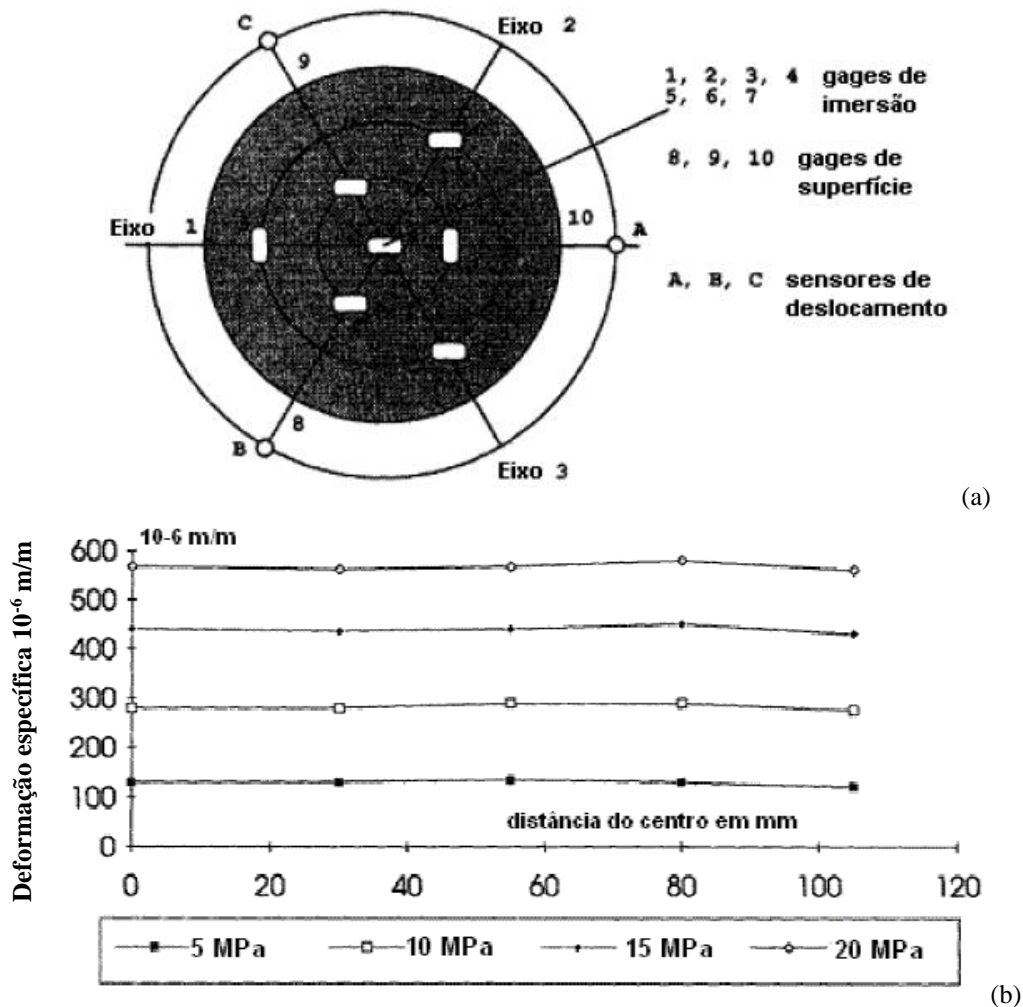
- corpos de prova ou máquina de ensaio com pratos com problemas de planeidade;

- carregamentos excêntricos;

- corpos de prova com relação comprimento/diâmetros maior que 2, favorecendo as deformações diferenciais.

No entanto, para comprovar e aprofundar os estudos sobre os acontecimentos ocorridos, Torrenti, Boulay e Puch (1994) realizaram experimentos utilizando três tipos de instrumentos e quatro níveis de carregamento nos mesmos corpos de prova, em que os resultados estão representados nas Figuras 3.31 (a) e (b), respectivamente.

Figura 3. 31- (a) distribuição dos instrumentos de medição das deformações no corpo-de-prova; (b) deformação medida para 4 níveis de sollicitação



Fonte: Torrenti, Boulay e Puch, 1994

Conforme Torrenti, Boulay e Puch (1994) não haveria porque não considerar a conservação da seção como plana em qualquer dos quatro níveis de carregamento. Além disso, os autores ainda afirmaram, no que obtiveram a concordância de Brandt (1995), que não haveria motivo para se alterar o método de ensaio de determinação do módulo de deformação do concreto para qualquer que fosse a instrumentação utilizada.

Pode-se dizer que mesmo tendo variado a instrumentação, Torrenti, Boulay e Puch (1994) mantiveram constantes os procedimentos de ensaio dos corpos-de-prova, o que não acontece com todos os laboratórios. Apesar de a mistura, da cura e do transporte terem sido idênticos (realizados pelo laboratório coordenador), os laboratórios participantes realizaram a preparação final dos corpos de prova através de retificação ou capeamento, a instrumentação para medição das deformações, os ensaios prévios de resistência à compressão, além do ensaio

de determinação do módulo de deformação propriamente dito, cada um com seus equipamentos e operadores, ainda que respeitando a mesma norma de ensaio brasileira.

Mesmo assim, nota-se que na Figura 3.30 (b), gráfico de Klink, a diferença entre os resultados captados a partir dos *strain gages* de superfície (distância do centro igual a 80 mm) e os sensores de deslocamento associados a dispositivo de contato com o corpo-de-prova que provavelmente se tratava de um compressômetro (distância do centro pouco maior que 100 mm) é significativa: para a tensão de 15 MPa (3^o nível), por exemplo, pode-se inferir deformações específicas de $460 \cdot 10^{-6}$ e $430 \cdot 10^{-6}$ GPa, respectivamente, o que significaria aproximadamente 2,3 GPa de diferença entre as determinações. Esse resultado já seria um valor significativo considerando-se a acurácia esperada para uma pesquisa realizada dentro de um único laboratório, e com variação metodológica unicamente dada pela alternância de instrumentações. A expectativa para um interlaboratorial seria de uma dispersão ainda maior.

Portanto, vale frisar que, sendo a magnitude desta diferença unicamente dada pela variação da instrumentação já que, inclusive, as leituras se deram nos mesmos corpos-de-prova, é de se esperar que a medida das deformações seja um dos mais significativos fatores intervenientes para a variabilidade observada nos resultados de módulo de deformação.

3.2.1 Instrumentos para medição das deformações

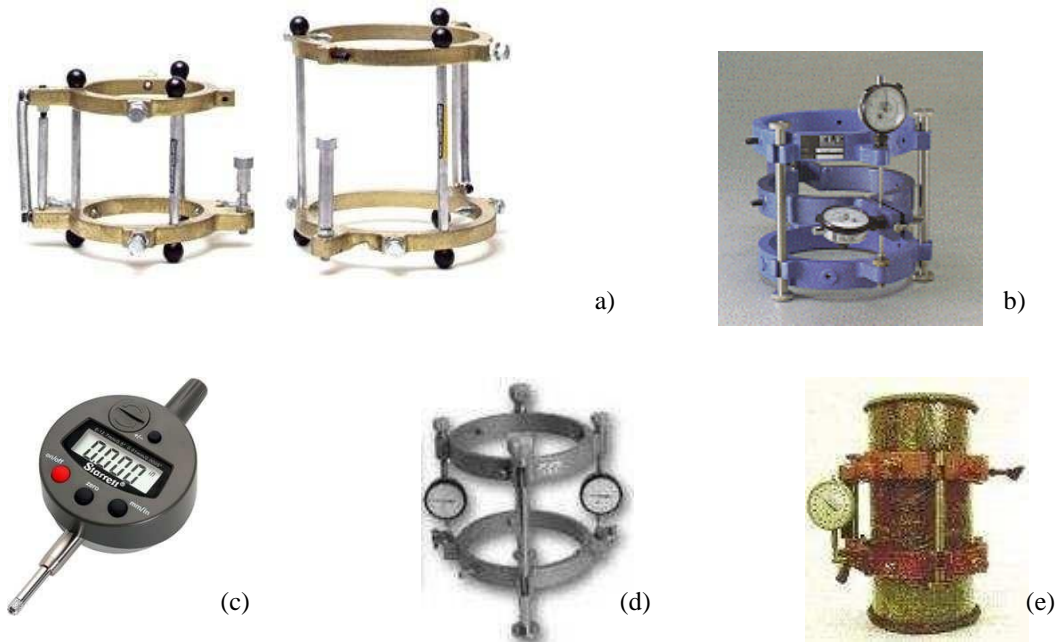
Entre os instrumentos mais comuns utilizados para medição das deformações tem-se:

- compressômetro com relógios comparadores;
- compressômetro com transdutores de deslocamento indutivos (*linear variable differential transformer* ou LVDT);
- transdutores resistivos ou extensômetros elétricos tipo *strain gages* de colagem superficial, de imersão ou de ancoragem tipo *clip gage*.

No geral, a captação das deformações ocorre sobre uma base de medida longitudinal de comprimento igual ao diâmetro do corpo-de-prova, fazendo ultrapassar o comprimento do terço central da altura do corpo-de-prova.

Na Figura 3.32 estão representados alguns desses equipamentos.

Figura 3. 32- Instrumentos para medição da deformação: (a) dispositivos compressômetros; (b) compressômetro-expansômetro; (c) relógio comparador; (d) compressômetro com 2 relógios comparadores; (e) compressômetro com 1 relógio comparador



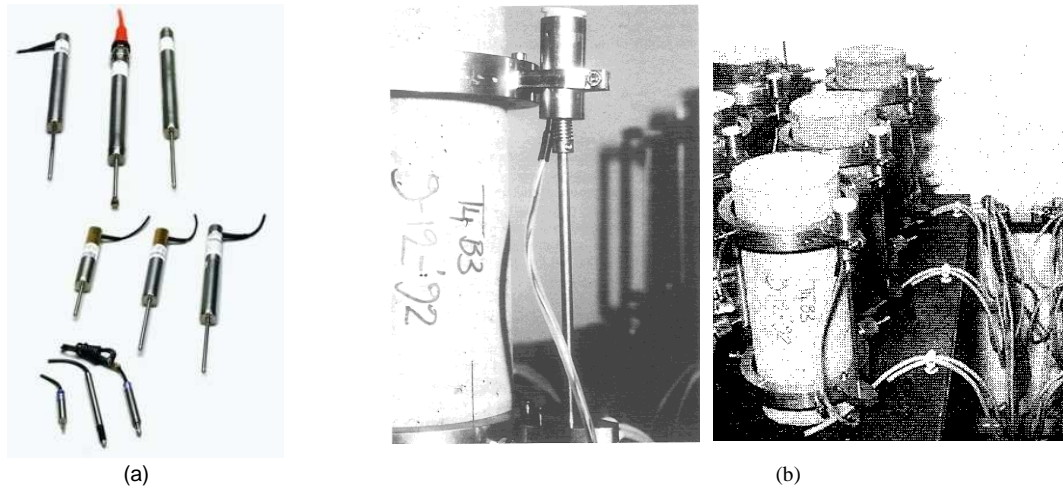
Fonte: Adaptado de Montija, 2007

Os compressômetros-expansômetros são dispositivos mundialmente conhecidos devido à sua divulgação na norma norte-americana ASTM C-469 desde a década de 1960 como aparelhagem básica para o ensaio de módulo de deformação do concreto. O dispositivo dito compressômetro é aquele utilizado para a ancoragem do medidor de deformação propriamente dito para leitura da deformação longitudinal do corpo-de-prova. O termo expansômetro é complementar à estrutura do dispositivo anterior e é utilizada para instalação de outro medidor de deformação para leitura da deformação transversal do corpo-de-prova enquanto solicitado à compressão no eixo longitudinal; é utilizada para a determinação do coeficiente de Poisson do concreto (MONTIJA, 2007).

Os medidores mais comuns acoplados ao compressômetro são os relógios comparadores. Resumidamente, seu mecanismo de funcionamento reage através de um pino de detecção da deformação (pino apalpador) em contato com um anteparo a uma força imposta pela aproximação da sustentação do medidor durante a compressão do corpo-de-prova.

Devido os compressômetros permitirem serem acoplados a transdutores com LVDT, podem ser aplicados modelos de transdutores indutivos LVDT e compressômetros com LVDT, como mostra a Figura 3.33.

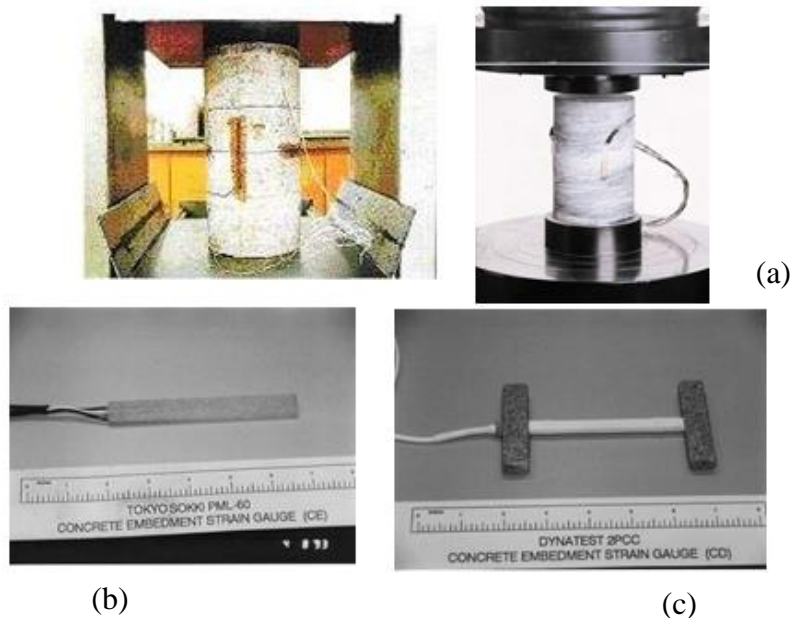
Figura 3. 33- Equipamentos para medir a deformação: (a) LVDT; (b) compressômetro com LVDT



Fonte: Adaptado de Montija, 2007

Como mencionado anteriormente, também existem os modelos de transdutores resistivos tipo strain gages, de colagem superficial e também de imersão. Os mesmos estão representados na Figura 3.34.

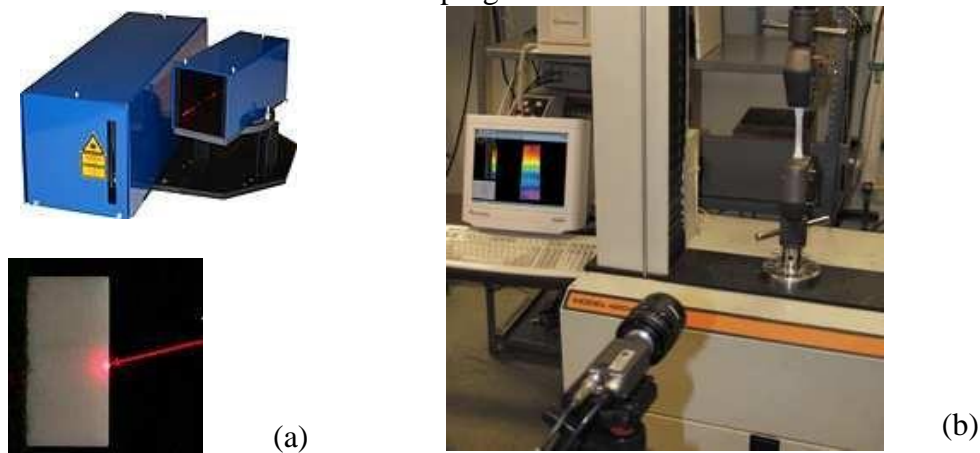
Figura 3. 34- Equipamentos para medição da deformação: (a) strain gages de colagem superficial; (b) transdutores laminados de imersão; (c) transdutores cilíndricos de imersão



Fonte: Adaptado de Montija, 2007

Ainda existem outros tipos de instrumentos de medição da deformação, com ópticos eletrônicos, com laser e microfilmagem sensorial programada, como mostra a Figura 3.35.

Figura 3. 35- Instrumentos para medição da deformação: (a) laser; (b) microfilmagem sensorial programada



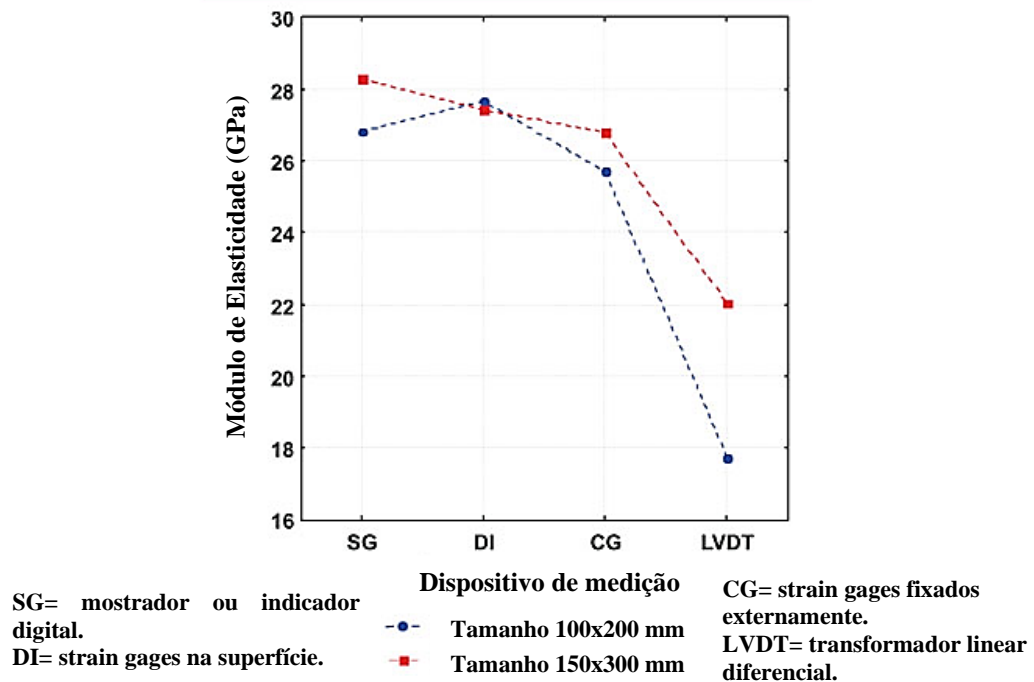
Fonte: Adaptado de Montija, 2007

No entanto, independentemente do tipo de instrumento de medição das deformações adotado, podem ocorrer variabilidades nos resultados obtidos nos ensaios, alguns mais e outros menos. As principais incertezas estão no poder de captação das informações de cada sistema, técnicas de operação de ensaio e as dificuldades de instalação de cada sistema sobre o corpo de prova.

A NBR 8522 (ABNT, 2017) não menciona qual é o tipo de medidor de deformação mais adequado para as medições experimentais, ou seja, qual deles permite a obtenção dos resultados de forma mais confiável e com menor dispersão dos resultados. A norma apenas menciona, no item 4.2, que os medidores de deformação devem ser elétricos ou mecânicos, e possibilitar a realização do ensaio sem interferência dos operadores. As normas internacionais também procedem da mesma maneira.

Araújo *et al.* (2012) estudaram o módulo de elasticidade do concreto utilizando quatro tipos diferentes de dispositivos de medição do módulo (mostrador ou indicador digital (SG), strain gages montados na superfície (DI), strain gages fixados externamente ou strain gages (CG), transformador linear diferencial (LVDT), e concluíram que mesmo seguindo os critérios especificados na NBR 8522 (ABNT, 2017), as variações nos resultados dos testes são relativamente significativas quando se compara os resultados obtidos pelos diferentes dispositivos de medição do módulo. E, ainda, que os medidores de deformação do tipo LVDT conduzem à obtenção de valores de módulo de elasticidade inferiores aos obtidos a partir do emprego de outros tipos de medidores de deformação, indiferente do tamanho do corpo de prova de ensaio, Figura 3.36.

Figura 3. 36 - Efeito do dispositivo de medição x módulo de elasticidade do concreto

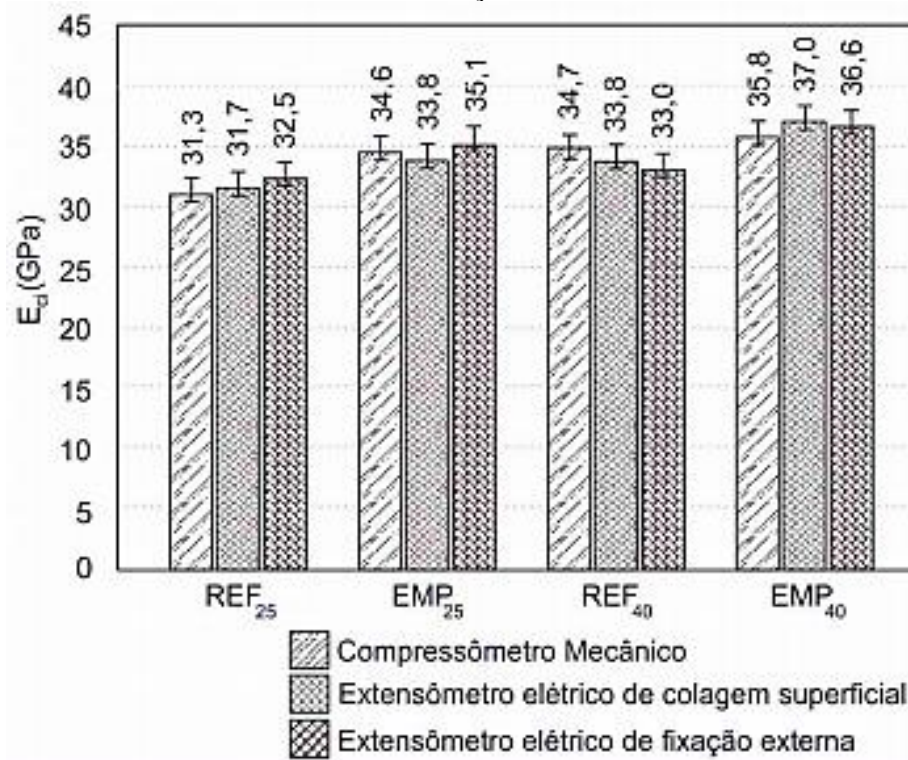


Fonte: Adaptado de Araújo *et al.*, 2012.

Montija (2007) e Lenz (2016) afirmam que os medidores de deformação elétricos apresentam vantagens sobre os extensômetros elétricos de colagem superficial (*strain gages*) que, uma vez utilizados, devem ser descartados, fazendo com que aumente o custo do ensaio, enquanto que os *clip gages*, LVDT e compressômetros são reutilizáveis.

Ao estudar diferentes misturas de concreto relacionadas à influência do tipo de medidor do módulo de deformação do concreto, Lenz (2016) concluiu que os resultados de módulo dos três tipos de medidores estudados podem ser considerados estatisticamente iguais, com uma confiabilidade de 95%, Figura 3.37. Porém os medidores de deformação que apresentaram os menores desvios padrão foi o do tipo extensômetro elétrico de fixação externa, com variação máxima do desvio padrão de 2,2 GPa. O medidor tipo compressômetro mecânico apresentou as maiores variações de desvio padrão, chegando a 4,5 GPa.

Figura 3. 37 - Módulo de elasticidade dos concretos estudados por tipo de equipamento de medição



Onde: REF₂₅ e REF₄₀ – referência, C25 e C40; EMP₂₅ e EMP₄₀ – processo de empacotamento, C25 e C40.

Fonte: Adaptado de Lenz, 2016.

Portanto, pode-se inferir que os ensaios de módulo de elasticidade com uso de diferentes tipos de medidores de deformação demonstraram que, neste caso, seguindo os critérios propostos na NBR 8522 (ABNT, 2008), as variações nos resultados dos ensaios não são significativas.

Diante da revisão bibliográfica exposta nos capítulos 2 e 3, evidencia-se o grande número de diferentes equações que existem para a previsão do módulo de elasticidade do concreto. No entanto, a maioria necessita de revisão para que possa permitir a sua aplicação com maior confiança. Ainda, pode-se concluir que existe uma série de fatores, relacionados as propriedades dos materiais que compõem o concreto e os parâmetros de ensaio, que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, e não apenas a resistência à compressão do concreto, como muitos dos modelos de previsão consideram.

Assim, é importante propor um modelo de previsão para o módulo de elasticidade do concreto que considere as principais variáveis que o influenciam, garantindo que os valores estimados para o módulo de elasticidade do concreto se aproximem o máximo possível dos valores experimentais. No capítulo seguinte é apresentado o programa experimental para alcançar os objetivos propostos por este trabalho.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A partir da revisão bibliográfica realizada sobre o módulo de elasticidade do concreto, foi possível identificar que os estudos realizados até o momento têm analisado as variáveis que influenciam no valor do módulo de maneira isolada ou aplicando poucas interações entre as variáveis independentes. Dentre os trabalhos analisados, identificou-se as variáveis que influenciam significativamente no módulo de elasticidade do concreto e, selecionou-se para o estudo: relação água/cimento (a/c), volume de pasta, módulo de elasticidade e forma do agregado graúdo. Mediante essa identificação propôs-se este estudo que visa analisar o valor do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do concreto sob a influência causada pelas variáveis e suas interações.

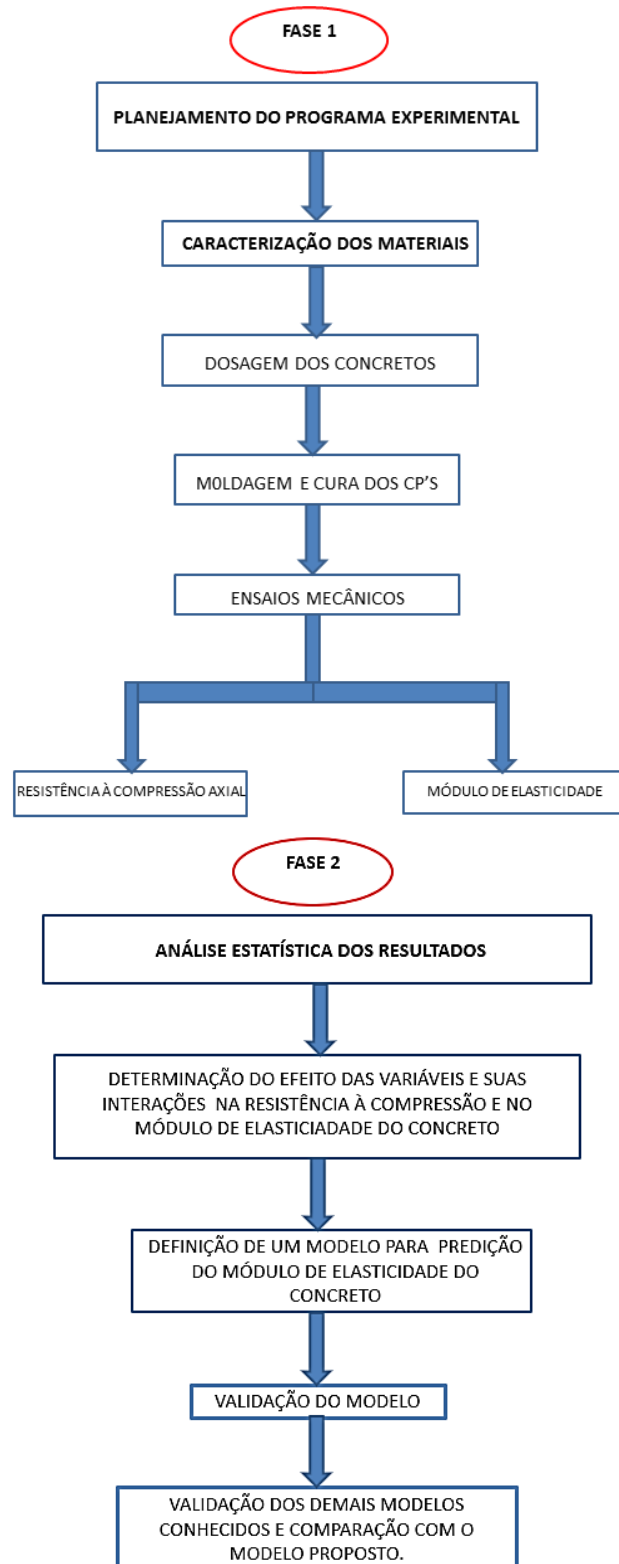
A fim de alcançar os objetivos propostos por essa tese, dividiu-se o estudo em duas fases, as quais foram chamadas de Fase 1 e Fase 2, respectivamente, conforme descrito a seguir:

- **FASE 1:** inicialmente foi realizado o planejamento do programa experimental, selecionados e preparados os materiais a serem utilizados e realizada a caracterização dos mesmos. Em seguida foram executadas as dosagens, moldagens, desmoldagens e cura dos corpos de prova. Vale frisar que para estabelecer os parâmetros de dosagem dos concretos foram consideradas as possíveis interações que ocorrem entre as diferentes variáveis identificadas que poderiam influenciar significativamente no módulo de elasticidade do concreto. Finalizada a cura das amostras, foram realizados os ensaios mecânicos do concreto, como a resistência à compressão axial, e posteriormente o módulo de elasticidade do concreto.

- **FASE 2:** a partir dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade e resistência à compressão das diferentes variáveis e interações, foi possível realizar a análise estatística dos resultados e identificar quais variáveis e interações influenciaram de maneira significativa no módulo, e assim, proceder o estudo para propor uma equação para prever o módulo de elasticidade, com o propósito de fornecer resultados mais próximos dos experimentais. Para verificar se o modelo formulado representa os resultados experimentais de forma adequada, realizou-se a validação do modelo por meio de cálculos de erros e coeficientes estatísticos. E por fim, fez-se a validação de alguns modelos propostos por normas e pela literatura, para permitir a comparação do modelo proposto e a identificação dos melhores modelos, ou seja, dos modelos que apresentam valores mais precisos, com menores erros e melhores coeficientes estatísticos, representando assim, os valores experimentais.

As fases descritas podem ser visualizadas na Figura 4.1 para o melhor entendimento dos procedimentos.

Figura 4. 1- Fluxograma dos procedimentos do estudo

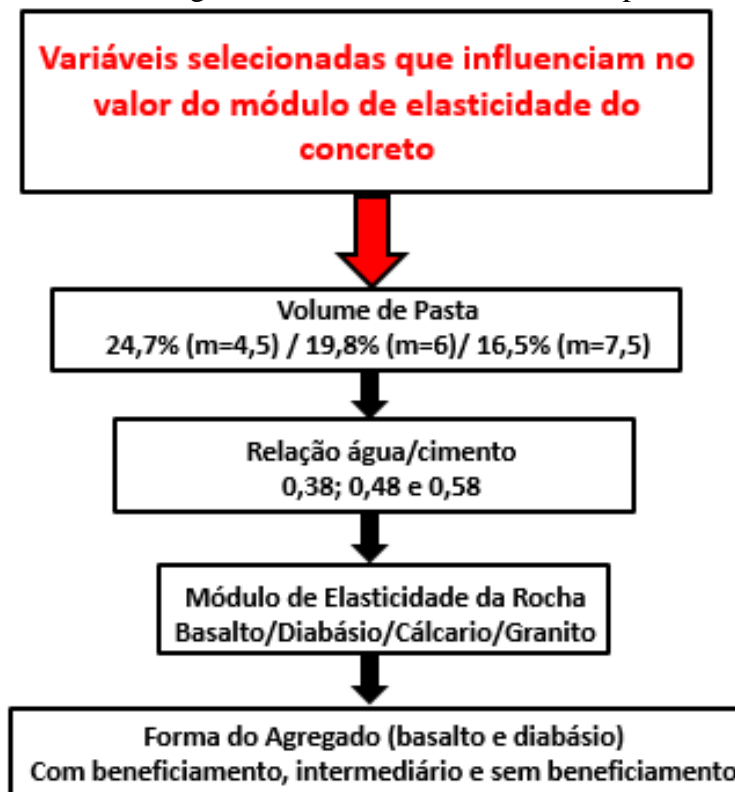


Fonte: Autoria própria.

A partir dos estudos já realizados por outros autores sobre as variáveis que influenciam no módulo de elasticidade do concreto, foi possível selecionar as principais para realizar o

presente estudo. Essas variáveis independentes estão apresentadas e identificadas de forma detalhada no fluxograma da Figura 4.2.

Figura 4. 2- Fluxograma das variáveis selecionadas para o estudo



Onde: m - relação agregados secos/cimento em massa.

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 4.2, a escolha das variáveis independentes para serem estudados o efeito isolado e as interações, e possíveis influências no valor do módulo de elasticidade do concreto se deve:

- **Volume de Pasta:** considerando que o concreto é formado por materiais mais rígidos (agregados) e materiais mais deformáveis (pasta), a variação desse parâmetro ocasiona mudanças no seu módulo de elasticidade. Por esse motivo fez-se a escolha em utilizar como parâmetros de dosagem três níveis para a pasta 24,7%, 19,8% e 16,5%, variando o m (relação agregados secos/cimento em massa em kg/kg) em 4,5, 6 e 7,5, respectivamente.
- **Relação água/cimento (a/c):** parâmetro de grande influência sobre o módulo de elasticidade do concreto. Estudos comprovam que a relação água/cimento é inversamente proporcional ao módulo de elasticidade do concreto (SILVA, 2003; HAECKER *et al.*, 2005; BAUER, PEREIRA e LEAL, 2012; XIE *et al.*, 2015; BILESKY, 2016; entre outros).

- **Módulo de Elasticidade da Rocha:** este parâmetro é de fundamental importância para o módulo de elasticidade do concreto, pois muitas vezes nem é preciso variar a tipologia da rocha, apenas o local de extração, para se obter valores distintos para o módulo da mesma, característica esta que fará com que se altere o módulo de elasticidade do concreto. Para verificar as interações deste parâmetro com os demais, fez-se a escolha de quatro tipologias de rochas de locais diferentes do estado do Rio Grande do Sul (Itaara, Estrela, Butiá e Bagé).

- **Forma do agregado:** considerando que a forma de britagem da rocha provoca alterações no módulo de elasticidade do concreto, utilizou-se para o basalto e diabásio três formas diferentes de britagem, ou seja, beneficiamento VSI (britador de eixo vertical), para tornar os grãos mais arredondados, intermediário (composto em laboratório por 50% de agregados com VSI e 50% sem VSI) e sem beneficiamento VSI. Para os agregados de granito e calcário utilizou-se somente uma forma do grão, ou seja, sem beneficiamento VSI, pois para esses tipos de agregados as pedreiras não utilizam o britador de eixo vertical para o beneficiamento.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO

Para a realização do estudo foram empregados diferentes materiais que estão listados nos próximos itens, bem como suas caracterizações.

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado no estudo foi o CP V-ARI. Optou-se em fazer a sua utilização devido a sua composição ser mais pura que a dos demais cimentos (sem adições quimicamente ativas), e também, a sua ampla utilização em obras de construção civil, principalmente em concreteiras. As caracterizações química, física e mecânica estão apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4. 1- Caracterização química do cimento

Composição química	CPV-ARI	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Perda ao fogo - PF	3,08	≤ 12,0%
Dióxido de Silício total - SiO ₂	18,81	-
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	4,75	-
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	2,68	-
Óxido de Cálcio total - CaO	60,88	-
Óxido de Magnésio - MgO	5,22	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico - SO ₃	2,28	≤ 4,5%
Óxido de sódio - Na ₂ O	0,18	-
Óxido de Potássio - K ₂ O	0,89	-
Óxido de Titânio - TiO ₂	0,3	-
Pentóxido de Fósforo - P ₂ O ₅	0,16	-
Óxido de Manganês - Mn ₂ O ₃	0,04	-
Óxido de Cálcio livre - CaO	1,17	-
Resíduo insolúvel - RI	1,19	≤ 3,5%
Anidrido Carbônico - CO ₂	2,27	≤ 5,5%

Fonte: Adaptado do Laboratório de Química - UFSM, 2018

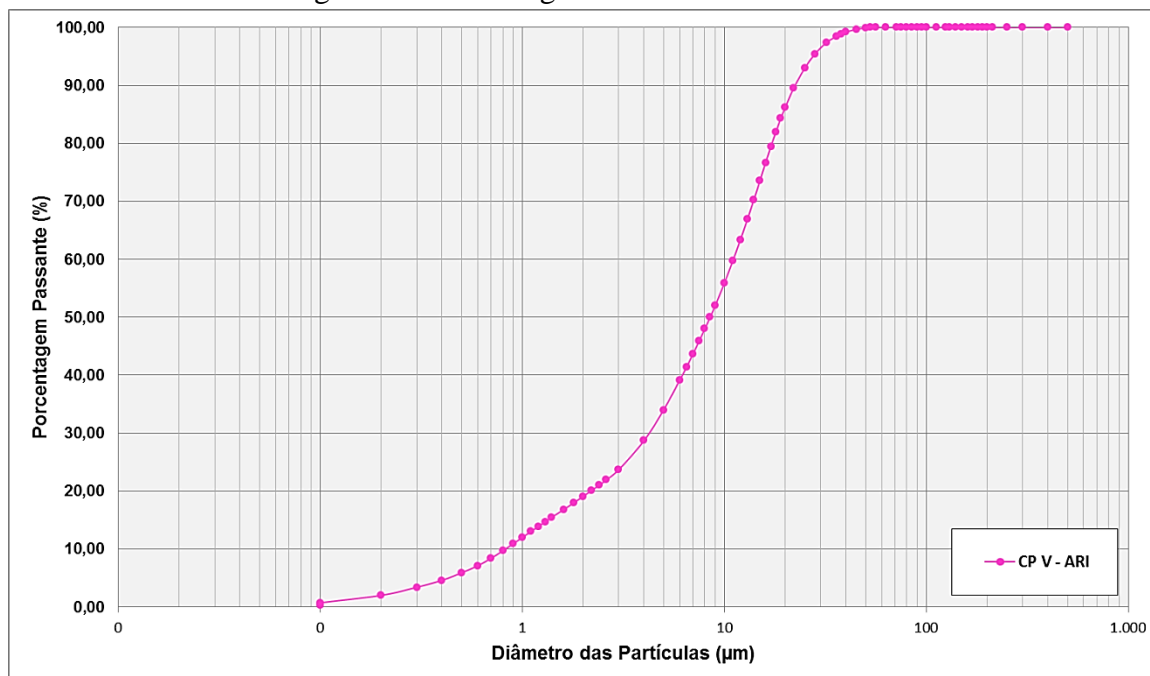
Tabela 4. 2- Caracterização física e mecânica do cimento

Características	Idade- dias	CPV-ARI	Limites NBR 16697 (ABNT, 2018)
Índice de Finura #0,075 mm (% retida)		0,02	≤ 6
Área específica BET (m ² /g)		5,96	-
Água da Pasta de Consistência normal (%)		29,1	-
Massa específica (g/cm ³)		3,14	-
Argamassa normal - Resistência à compressão axial (MPa)	3	38,1	≥ 24
	7	38,6	≥ 34
	28	50,0	-
Início de pega (min)		155	≥ 60
Fim de pega (min)		190	≤ 600
Dimensão média das partículas (µm)		8,50	-
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 10% das partículas (µm)		0,83	-
Diâmetro abaixo do qual encontra-se 90% das partículas (µm)		22,38	-

Fonte: Adaptado do Laboratório de cerâmica – UFRGS, 2018

A curva granulométrica do cimento pode ser observada na Figura 4.3, obtida através do ensaio de granulometria por difração a laser. O diâmetro médio ficou em 8,5 μm .

Figura 4.3 - Curva granulométrica do cimento

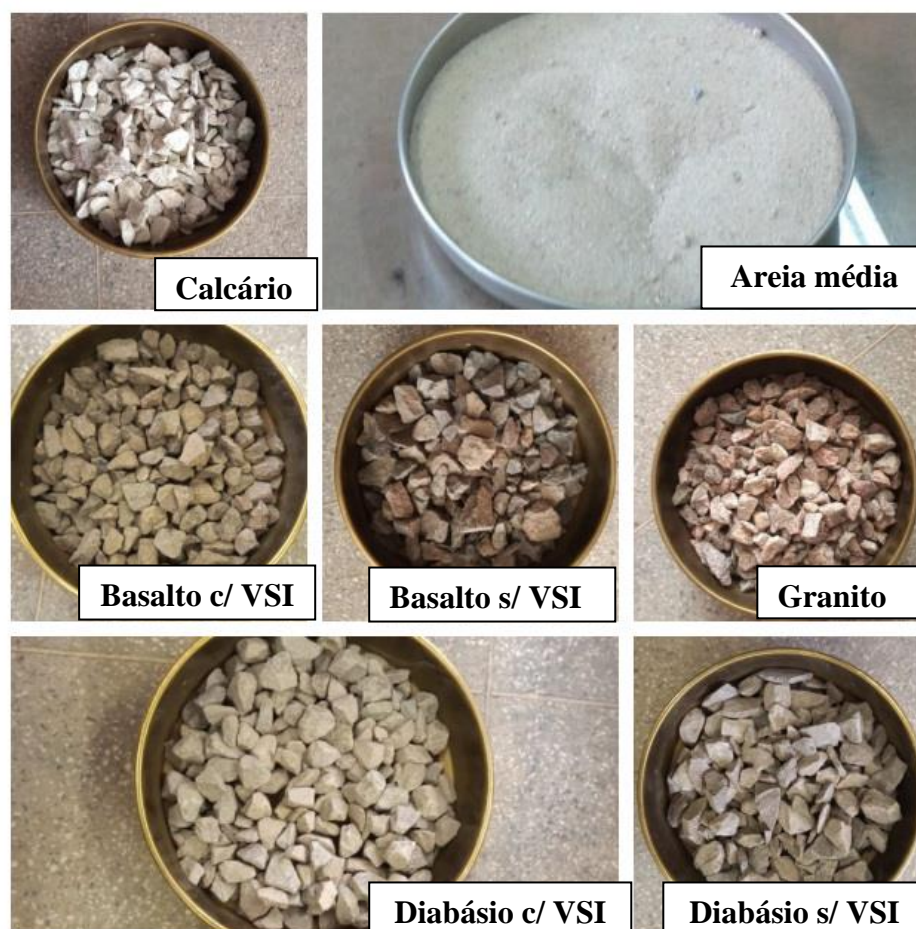


Fonte: Adaptado da Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018

4.1.2 Agregados

Como agregado miúdo foi utilizado areia natural, proveniente do rio Jacuí da cidade de Rio Pardo – RS, e como agregados graúdos foram utilizadas rochas de basalto, diabásio, granito e calcário, todas classificadas na dimensão máxima de 19 mm. As rochas de basalto e diabásio foram estudadas com beneficiamento VSI (britador de eixo vertical), intermediário (50% com VSI e 50% sem VSI) e sem beneficiamento VSI, para verificar a influência da forma do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto quando da interação com as demais variáveis (Figura 4.4). A escolha dessas rochas se deve à diferença de módulo de elasticidade entre elas, e a fixação da dimensão máxima devido a maior utilização em obra.

Figura 4. 4 - Agregados utilizados



Fonte: Autoria própria.

Para os ensaios de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade das rochas, inicialmente, fez-se a extração de oito amostras em formato cilíndrico de 10x20 cm de cada uma das diferentes rochas, quatro para cada um dos dois ensaios, em seguida regularizaram-se as superfícies das mesmas por meio da retificação das faces, além da utilização de placa de neoprene.

Após a finalização da preparação das amostras, ensaiou-se as mesmas na prensa hidráulica INSTRON Modelo EDX 1500 (Figura 4.5) e obteve-se os resultados da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de acordo com a norma NBR 10341 (ABNT, 2006). Os resultados estão apresentados na Tabela 4.3.

Figura 4. 5 - Ensaio de módulo de elasticidade da rocha



Fonte: Autoria própria

Tabela 4. 3 - Local de extração das rochas, tipo de rocha, resistência à compressão e módulo de elasticidade

Local de extração	Agregado Graúdo	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa) - média	D.P (GPa)	C.V (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa) - médio	D.P (GPa)	C.V (%)
Itaara - RS	Diabásio	175,4	174,9	0,57	0,33	79,8	79,2	0,51	0,64
		174,2				78,8			
		174,6				78,7			
		175,3				79,3			
Estrela - RS	Basalto	107,5	108,3	0,59	0,55	90,6	91,2	0,61	0,67
		108,9				91,8			
		108,4				90,8			
		108,5				91,7			
Butiá - RS	Granito	87,9	87,7	0,43	0,50	66,1	65,8	0,34	0,52
		88,1				65,7			
		87,1				65,9			
		87,6				65,3			
Bagé - RS	Calcário	79,6	80,2	0,55	0,68	62,8	63,0	0,42	0,67
		80,8				62,5			
		79,9				63,3			
		80,5				63,4			

Tanto para o agregado miúdo quanto para os grãos foram realizados os ensaios de caracterização física. As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam a composição granulométrica desses agregados e nas Figuras 4.6 e 4.7 pode-se visualizar as respectivas curvas granulométricas.

A composição granulométrica dos agregados foi determinada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003). As curvas granulométricas dos agregados grãos foram compostas em laboratório com auxílio do peneirador mecânico para que as amostras apresentassem, no maior grau possível, os mesmos tamanhos de grãos na série normal de peneiras.

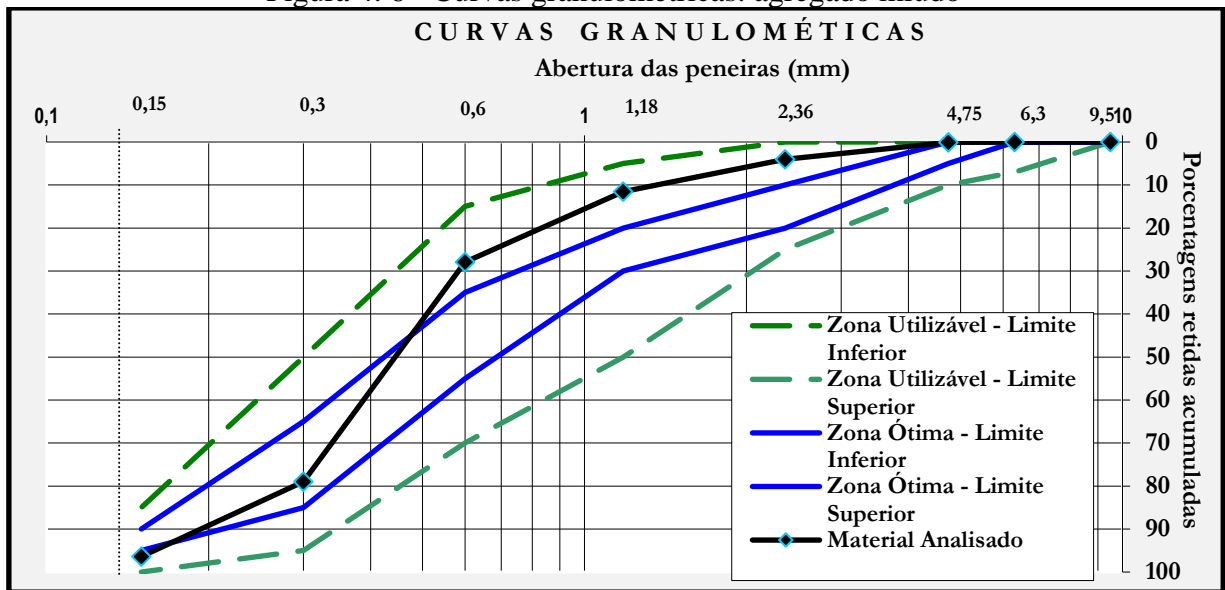
Tabela 4. 4- Composição granulométrica: agregado miúdo

Peneiras(mm)	Massa retida (kg)	% em massa	
		Retida	Acumulada
	Areia	Areia	Areia
1,18	0,150	3	3
600 μm	1,067	22	25
300 μm	2,760	55	80
150 μm	0,960	19	99
Fundo	0,063	1	100
TOTAL	5	100	207
Dimensão máxima característica			1,18 mm
Módulo de finura			2,07

Tabela 4. 5 - Composição granulométrica: agregados grãos

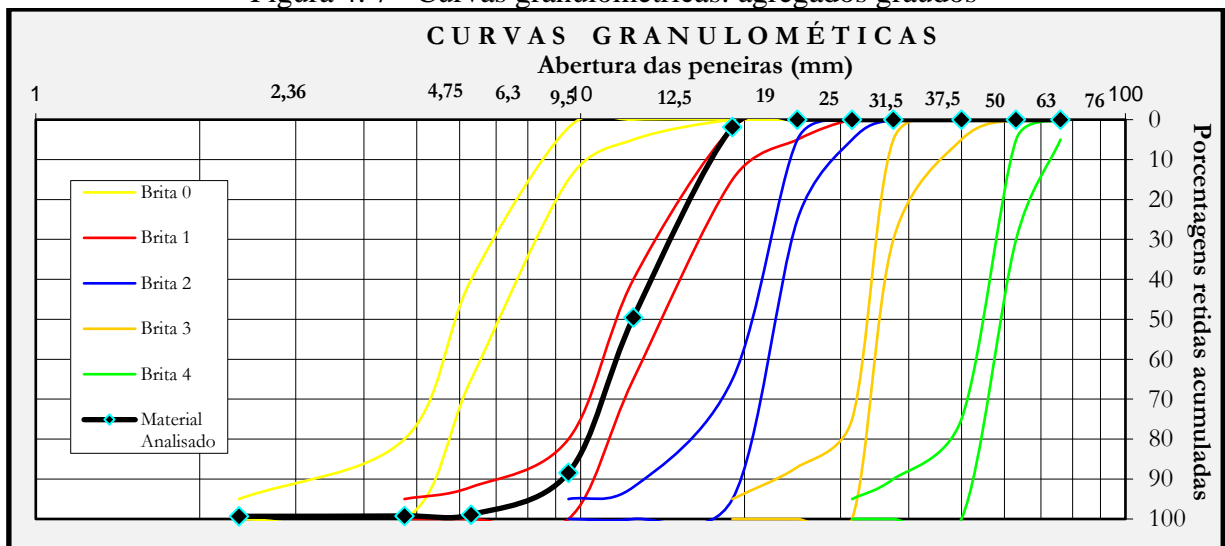
Peneiras (mm)	Massa retida (kg)	% em massa	
		Retida	Acumulada
	Agregado grão	Agregado grão	Agregado grão
19	0,280	2	2
12,5	7,160	48	50
9,5	5,840	39	89
6,3	1,580	10	99
4,75	0,049	0	99
2,36	0,014	0	99
1,18	-	0	99
600 μm	-	0	99
300 μm	-	0	99
150 μm	-	0	99
Fundo	0,076	1	100
TOTAL	15	100	685
Dimensão máxima característica			19 mm
Módulo de Finura			6,85

Figura 4. 6 - Curvas granulométricas: agregado miúdo



Fonte: Autoria própria.

Figura 4. 7 - Curvas granulométricas: agregados graúdos



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.6 apresenta a caracterização física para os agregados utilizados no estudo.

Tabela 4. 6- Caracterização física: agregados miúdo e graúdos

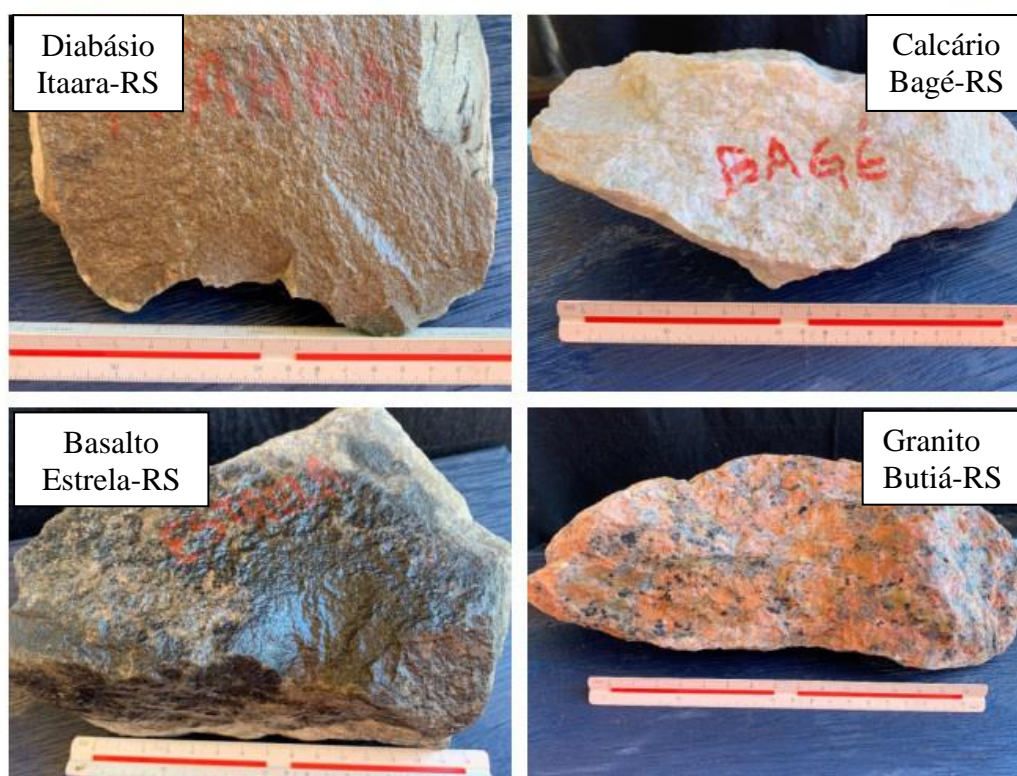
Características	Areia	Basalto	Diabásio	Granito	Calcário
Massa Específica (g/cm ³) (ABNT NBR NM 52:2009) com VSI	2,62	2,89	2,51	-	-
Massa Específica (g/cm ³) (ABNT NBR NM 52:2009) intermediário	-	2,92	2,53	-	-
Massa Específica (g/cm ³) (ABNT NBR NM 52:2009) sem VSI	-	2,95	2,58	2,67	2,74
Massa Unitária (g/cm ³) (ABNT NBR NM 45:2006) com VSI	1,66	1,52	1,38	-	-
Massa Unitária (g/cm ³) (ABNT NBR NM 45:2006) intermediário	-	1,48	1,35	-	-
Massa Unitária (g/cm ³) (ABNT NBR NM 45:2006) sem VSI	-	1,46	1,33	1,32	1,38
Volume de vazios (%) (ABNT NBR NM 45:2006) com VSI	-	47,40	45,02	-	-
Volume de vazios (%) (ABNT NBR NM 45:2006) intermediário	-	49,32	46,64	-	-
Volume de vazios (%) (ABNT NBR NM 45:2006) sem VSI	-	50,51	48,45	50,56	49,64
Índice de forma (ABNT NBR NM 7809:2019) com VSI	-	1,56	1,58	-	-
Índice de forma (ABNT NBR NM 7809:2019) Intermediário	-	2,09	2,02	-	-
Índice de forma (ABNT NBR NM 7809:2019) sem VSI	-	2,58	2,50	1,87	1,69
Absorção de água (%) (ABNT NBR NM 30:2001) com VSI	-	1,70	2,04	-	-
Absorção de água (%) (ABNT NBR NM 30:2001) intermediário	-	1,71	2,05	-	-
Absorção de água (%) (ABNT NBR NM 30:2001) sem VSI	0,32	1,72	2,05	1,37	1,14

Realizada a caracterização física dos agregados percebe-se que a massa específica alterou muito pouco se comparar os agregados com VSI e sem VSI, o que possivelmente pode ser justificada pela variabilidade de ensaio. Ainda, conclui-se que houve uma grande variação no índice de forma quando realizada a britagem com VSI em relação ao sem VSI para os agregados de basalto e diabásio, permitindo assim, o estudo da influência da forma da rocha no módulo de elasticidade do concreto. O termo “intermediário” foi utilizado para a composição com 50% de brita com VSI e 50% de brita sem VSI, a qual foi realizada em laboratório.

No ensaio de volume de vazios, o agregado com maiores valores foram o granito e o basalto (sem VSI), com aproximadamente 50%.

A análise petrográfica das rochas foi determinada conforme as diretrizes da NBR 7389 (ABNT, 2009) por Nummer, Universidade Federal de Santa Maria (2020), com o intuito de identificar a composição mineralógica e a classificação petrográfica de cada uma das rochas em estudo. As amostras utilizadas para as análises podem ser visualizadas na Figura 4.8.

Figura 4. 8 - Rochas utilizadas para as análises Petrográficas



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4.7 está apresentado um resumo das análises para cada uma das rochas em estudo e as análises completas estão no Anexo A.

Tabela 4. 7 - Resumo das Análises Petrográficas

Empresa Local	Textura e Estrutura	Estado de Alteração	Composição Mineralógica	Classificação Petrográfica	Classificação de Venda
Compasul Itaara	Rocha holocristalina, fanerítica muito fina a afanítica.	Processos de alteração hidrotermal nos minerais máficos (escuros)	Intercrescimento micrográfico de feldspato e quartzo e a presença de minerais opacos	Rocha ígnea vulcânica-RIODACITO	Diabásio
Compasul Estrela	Rocha inequigranula, microporfirítica com fenocristais prismáticos de plagioclásio e secundariamente piroxênios dispersos em matriz fanerítica média a fina	Classificada como rocha pouco alterada – A1 (DNER-IE 006/94).	Rocha cristalina formada por um arranjo de piroxênios, plagioclásios e minerais opacos.	Rocha ígnea vulcânica - BASALTO	Basalto
Compasul Butiá	Presença de grãos de quartzo e feldspatos quebrados e formação de subgrãos e microfraturas, como efeito da tectônica que atuou no maciço	Pouca alteração, evidenciada pela perda de brilho de alguns minerais de feldspato e algumas porções da rocha com tons esverdeados	Rocha formada por cristais bem desenvolvidos, textura inequigranular porfirítica	Rocha Ígnea Plutônica - SIENOGRANITO	Granito
Mônego Bagé	Textura granoblástica, representada por minerais carbonatados, equidimensionais	Minerais quebrados e contatos fendilhados podem indicar que o maciço sofreu esforços tectônicos	Presença de aproximadamente 90% de dolomitas (preferencialmente) e 10% de minerais acessórios como anfibólios e epidoto, e serpentinas.	Rocha metamórfica: MÁRMORE DOLOMÍTICO	Calcário

Fonte: Adaptado de Nummer, Universidade Federal de Santa Maria, 2020.

Mesmo que a classificação petrográfica das rochas se diferenciem em nome pelos quais elas são conhecidas e vendidas, neste trabalho as rochas serão denominadas conforme a classificação de venda, ou seja, pela denominação que as mesmas são comercializadas na região da pedreira. Vale frisar que é importante que sejam conhecidas as características mecânicas das

rochas, e as utilizem como dados de entrada de modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto, para não estar cometendo erros no momento de estimá-lo. Pois a tipologia da rocha pode ser a mesma, mas as suas características mecânicas mudam conforme o local de extração.

4.1.3 Água

Para a preparação dos concretos foi utilizada água potável, fornecida pela Universidade Federal de Santa Maria.

4.1.4 Aditivo

Quando necessário fez-se o uso de aditivo superplastificante, isento de cloretos. Os dados técnicos estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4. 8 - Dados técnicos do aditivo superplastificante Plastoflow 7025

Característica	Plastoflow 7025
Base química	Solução de policarboxilatos em meio aquoso
Aspecto	Líquido
Cor	amarelado
Massa específica	~1,070 g/cm ³
pH	~4,5
Teor de cloretos	Não contém adição de cloretos

Fonte: Viapol, 2017.

4.2 PARÂMETROS DE DOSAGEM DOS CONCRETOS

Os parâmetros de dosagem dos concretos foram estabelecidos com base no método de dosagem proposto pelo IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992, p.225-274). Este Método consiste na determinação do teor ótimo de argamassa da mistura para um determinado agregado graúdo. O valor de abatimento foi fixado em 100 ± 20 mm, medido de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998). Como neste estudo foram utilizados oito tipos de agregados graúdos, determinou-se o volume de vazios de cada um deles (Tabela 4.5) e a partir do agregado com maior teor de vazios (granito), definiu-se o teor ótimo de argamassa de 54% (teor padrão geralmente utilizado em concretos bombeáveis classe S100 – abatimento de 100 mm até 160 mm (NBR 7212, ABNT 2012)), que foi empregado para todos os demais tipos de agregados. Partindo-se do traço, calculado para $m=6$ (relação agregados secos/cimento em massa), que foi

chamado de intermediário, foram produzidos os traços mais pobre ($m=7,5$) e mais rico ($m=4,5$) em cimento.

A partir dos parâmetros de dosagem, buscou-se obter as resistências características à compressão (f_{ck}) de 25, 35 e 45 MPa. Essas faixas de resistências foram escolhidas por serem as mais usuais em concreteiras, dessa forma, para se obter consumos menores de cimento foi necessário ajustar os teores de agregados, o que explica as relações cimento:agregados utilizadas. Pela necessidade de manter o volume de pasta constante, a relação água/cimento não poderia variar para os diferentes materiais, dessa forma, a mesma foi fixada em 0,38, 0,48 e 0,58. Conhecendo o teor de argamassa e a massa específica de cada material, foi possível calcular os consumos de materiais por metro cúbico de concreto. O aditivo superplastificante somente foi utilizado quando necessário para ajustar as faixas de abatimento.

Posteriormente foi formulada uma grande matriz com as interações possíveis entre as variáveis selecionadas que poderiam influenciar significativamente o módulo de elasticidade do concreto, como: relação água/cimento, resistência à compressão, volume de pasta, módulo de elasticidade da rocha e forma do agregado, sendo produzidas em laboratório as misturas (Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12). A Tabela 4.9 apresenta a legenda que define os traços, a partir do tipo de agregado, por exemplo, D25 - m4,5 significa agregado graúdo de diabásio, resistência característica à compressão de 25 MPa e relação agregados secos/cimento em massa em kg/kg de 4,5.

Tabela 4. 9- Legenda dos traços

TRAÇO	f_{ck}	Descrição
Código	(MPa)	
D25	25	Diabásio
D35	35	
D45	45	
B25	25	Basalto
B35	35	
B45	45	
G25	25	Granito
G35	35	
G45	45	
C25	25	Calcário
C35	35	
C45	45	

Tabela 4. 10 - Traços unitários com as interações entre as variáveis definidas para m=4,5 e volume de pasta 24,7%

Beneficiament o	Traço	f_{ck} (MPa)	COMPOSIÇÃO DO TRAÇO UNITÁRIO (kg)				α (%)	Consum o de cimento (kg/m ³)	H (%)	Abatimen to (mm)	Aditiv o (%)
	Código		Cimen to	Arei a	Brita	a/c					
Com VSI	D25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	376	10,55	85	0,00
	D35 - m4,5	35	1	1,97	2,53	0,48	54	391	8,73	80	0,18
	D45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	407	6,91	80	0,20
Intermediária	D25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	376	10,55	80	0,00
	D35 - m4,5	35	1	1,97	2,53	0,48	54	391	8,73	80	0,20
	D45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	407	6,91	90	0,35
Sem VSI	D25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	376	10,55	80	0,20
	D35 - m4,5	35	1	1,97	2,53	0,48	54	391	8,73	95	0,40
	D45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	407	6,91	90	0,61
Com VSI	B25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	396	10,55	80	0,00
	B35 - m4,5	35	1	1,97	2,5	0,48	54	412	8,73	80	0,20
	B45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	430	6,91	80	0,30
Intermediária	B25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	396	10,55	80	0,00
	B35 - m4,5	35	1	1,97	2,5	0,48	54	412	8,73	80	0,25
	B45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	430	6,91	100	0,32
Sem VSI	B25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	396	10,55	100	0,40
	B35 - m4,5	35	1	1,97	2,53	0,48	54	412	8,73	100	0,74
	B45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	430	6,91	110	0,82
Sem VSI	G25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	385	10,55	80	0,20
	G35 - m4,5	35	1	1,97	2,53	0,48	54	400	8,73	95	0,40
	G45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	417	6,91	80	0,48
Sem VSI	C25 - m4,5	25	1	1,97	2,53	0,58	54	388	10,55	110	0,15
	C35 - m4,5	35	1	1,97	2,53	0,48	54	404	8,73	80	0,33
	C45 - m4,5	45	1	1,97	2,53	0,38	54	421	6,91	80	0,45

Onde: D – Diábasio; B – Basalto; G – Granito; C – Calcário; f_{ck} – Resistência Característica à Compressão; a/c – relação água/cimento; α - teor de argamassa; H – relação água/materiais secos.

Tabela 4. 11 - Traços unitários com as interações entre as variáveis definidas para m=6 e volume de pasta 19,8%

Beneficiament o	Traço	f _{ck} (MPa)	COMPOSIÇÃO DO TRAÇO UNITÁRIO (kg)				α (%)	Consumo (kg/m ³)	H (%)	Abatiment o (mm)	Aditiv o (%)
	Códig o		Ciment o	Arei a	Brit a	a/c					
Com VSI	D25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	308	8,29	80	0,00
	D35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	318	6,86	80	0,32
	D45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	329	5,43	120	0,64
Intermediária	D25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	308	8,29	80	0,20
	D35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	318	6,86	120	0,36
	D45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	329	5,43	120	0,74
Sem VSI	D25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	308	8,29	95	0,46
	D35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	318	6,86	120	0,55
	D45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	329	5,43	120	1,20
Com VSI	B25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	325	8,29	100	0,02
	B35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	336	6,86	100	0,18
	B45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	348	5,43	120	0,80
Intermediária	B25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	325	8,29	80	0,20
	B35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	336	6,86	80	0,30
	B45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	348	5,43	100	1,20
Sem VSI	B25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	325	8,29	80	0,27
	B35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	336	6,86	100	0,38
	B45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	348	5,43	90	1,25
Sem VSI	G25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	316	8,29	80	0,18
	G35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	326	6,86	80	0,34
	G45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	337	5,43	80	0,90
Sem VSI	C25 - M6	25	1	2,78	3,22	0,58	54	319	8,29	100	0,20
	C35 - M6	35	1	2,78	3,22	0,48	54	330	6,86	100	0,40
	C45 - M6	45	1	2,78	3,22	0,38	54	341	5,43	90	1,20

Onde: D – Diábasio; B – Basalto; G – Granito; C – Calcário; f_{ck} – Resistência Característica à Compressão; a/c – relação água/cimento; α - teor de argamassa; H – relação água/materiais secos.

Tabela 4. 12 - Traços unitários com as interações entre as variáveis definidas para m=7,5 e volume de pasta 16,5%

Beneficiamento	Traço	f_{ck} (MPa)	COMPOSIÇÃO DO TRAÇO UNITÁRIO (kg)				α (%)	Consumo (kg/m ³)	H (%)	Abatimento (mm)	Aditivo (%)
	Código		Cimento	Areia	Brita	a/c					
Com VSI	D25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	261	6,82	90	0,00
	D35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	268	5,65	90	0,54
	D45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	276	4,47	80	1,10
Intermediária	D25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	261	6,82	120	0,75
	D35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	268	5,65	80	0,95
	D45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	276	4,47	80	1,30
Sem VSI	D25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	261	6,82	80	0,84
	D35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	268	5,65	110	1,10
	D45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	276	4,47	90	1,45
Com VSI	B25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	276	6,82	80	0,10
	B35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	284	5,65	80	0,62
	B45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	292	4,47	90	0,95
Intermediária	B25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	276	6,82	80	0,55
	B35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	284	5,65	80	0,84
	B45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	292	4,47	90	1,40
Sem VSI	B25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	276	6,82	110	0,70
	B35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	284	5,65	80	0,97
	B45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	292	4,47	80	1,50
Sem VSI	G25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	268	6,82	90	0,25
	G35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	275	5,65	95	0,45
	G45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	283	4,47	80	1,30
Sem VSI	C25 - M7,5	25	1	3,59	3,91	0,58	54	271	6,82	80	0,25
	C35 - M7,5	35	1	3,59	3,91	0,48	54	278	5,65	90	0,66
	C45 - M7,5	45	1	3,59	3,91	0,38	54	286	4,47	80	1,60

Onde: D – Diábasio; B – Basalto; G – Granito; C – Calcário; f_{ck} – Resistência Característica à Compressão; a/c – relação água/cimento; α - teor de argamassa; H – relação água/materiais secos.

4.3 MOLDAGEM, DESMOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA

Todos os materiais utilizados para a moldagem do concreto foram previamente preparados. Os agregados foram lavados e secos, visando garantir as mesmas condições para os diferentes agregados graúdos, que foram peneirados para uniformizar a composição granulométrica e ajustar a mesma dimensão máxima estabelecida. Os demais materiais foram apenas armazenados em locais apropriados, livre de umidade. As pesagens foram realizadas conforme os quantitativos calculados a partir da definição dos traços unitários.

Para cada combinação foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão axial e 4 corpos de prova cilíndricos para o ensaio de módulo de elasticidade estático, com dimensões 10 x 20 cm. Antes da moldagem cada fôrma recebeu desmoldante para posteriormente facilitar a desmoldagem das amostras.

Fez-se o uso de uma betoneira de eixo inclinado para a produção dos concretos, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016). Antes da mistura dos materiais na betoneira, foi realizada a imprimação da mesma. A ordem de colocação dos materiais foi sempre a mesma: inicialmente foi colocado 100% da brita, em seguida aproximadamente 30% da água e 100% de cimento, acrescentando o restante da água e 100% da areia. As misturas foram realizadas por aproximadamente cinco (5) minutos a partir da colocação total da água. Quando necessário foi empregado aditivo superplastificante, e assim, o tempo de mistura pode se estender até a perfeita incorporação do aditivo aos materiais. Para cada betonada foi realizada a verificação do abatimento do tronco de cone, conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), garantindo que o mesmo se mantivesse dentro dos limites estabelecidos (100 ± 20 mm).

Finalizados os procedimentos de moldagem, os corpos de prova ficaram armazenados à temperatura ambiente durante 24 horas, cobertos com lona plástica. Em seguida, foram desmoldados e colocados em reservatórios de água com cal e curados até completar os 28 dias de idade, com temperatura e umidade relativa do ar controladas, conforme prescreve a NBR 9479 (ABNT, 2006).

Após o período de cura cada amostra foi retificada e submetida aos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de deformação do concreto de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522 (ABNT, 2017), respectivamente.

4.4 ENSAIOS REALIZADOS COM O CONCRETO

Finalizado o período de cura estabelecido, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de deformação do concreto, conforme descrito nos próximos itens.

4.4.1 Resistência à compressão axial

Após a retificação dos corpos de prova, com o intuito de permitir o paralelismo entre as bases e a ortogonalidade em relação ao eixo longitudinal, foi realizado o ensaio de resistência à compressão axial dos corpos de prova de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) na prensa hidráulica INSTRON - Modelo EDX 1500, com capacidade 1500 KN, Figura 4.9. A resistência à compressão axial do concreto foi realizada com três corpos de prova para cada mistura, aos 28 dias de idade.

Figura 4. 9 - Ensaio de Resistência à Compressão Axial



Fonte: Autoria própria.

Esses resultados foram tomados como base para o estabelecimento do plano de carregamento para o ensaio do módulo de deformação do concreto.

4.4.2 Módulo de deformação do concreto

Para a análise dessa propriedade do concreto foram utilizadas quatro amostras para cada mistura, aos 28 dias. Os procedimentos seguiram as prescrições estabelecidas pela NBR 8522 (ABNT, 2017).

O ensaio foi realizado na mesma prensa hidráulica que o ensaio de resistência à compressão axial, utilizando como medidor de deslocamento para a verificação das deformações o compressômetro com transdutores de deslocamento indutivo (LVDT - *Linear Variable Differential Transformer*), composto por quatro sensores independentes, em que para a obtenção da deformação o equipamento emite uma média por meio de cada sensor, leitura esta transmitida diretamente para o software integrado da INSTRON, Figura 4.10.

Figura 4. 10 - Equipamento utilizado para medir os deslocamentos das deformações – LVDT



Fonte: Autoria própria.

O cálculo do módulo de deformação do concreto foi realizado conforme a Equação 1, estabelecida pela NBR 8522 (ABNT, 2017).

$$E_{ci} = \frac{\Delta_{\sigma}}{\Delta_{\varepsilon}} \times 10^{-3} = \frac{\Delta_{\sigma a} - \Delta_{\sigma b}}{\Delta_{\varepsilon a} - \Delta_{\varepsilon b}} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde:

E_{ci} : módulo de elasticidade (GPa);

σ_a : $0,3 f_c$, é a tensão maior (MPa);

σ_b : $0,5$ MPa, é a tensão básica (MPa);

ε_a : deformação específica média dos corpos de provas ensaiados sob tensão maior.;

ε_b : deformação específica média dos corpos de provas ensaiados sob tensão básica;

4.5 ESTUDO DO MODELO DE PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

O estudo do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto foi realizado no *software* Action (versão 3.7), que é um sistema estatístico desenvolvido pela Estatcamp e utiliza o R como a principal linguagem de programação estatística de uso mundial, por meio de um sistema próprio, conectando o R com o Excel (<http://www.portalaction.com.br/>).

O estudo se deu inicialmente pela seleção das variáveis do modelo de regressão linear múltipla, em que foram utilizadas as técnicas de “todos os modelos possíveis” e de “seleção automática” disponíveis pelo *Software*. Na técnica de “seleção de todos os modelos possíveis”, os critérios adotados para avaliação do modelo foram o Critério de Informação de Akaike (AIC) e o Critério de Informação de Bayesiano (BIC), os quais indicaram que o modelo mais adequado para os dados da pesquisa seria considerar todas as variáveis (volume de pasta, f_{cj} , forma do agregado graúdo e módulo de elasticidade da rocha). Para a seleção das variáveis pela técnica de “seleção automática” foram utilizados os métodos *Forward*, *Backward* e *Stepwise*, em que o critério utilizado para a adição e/ou remoção de variáveis foi o teste F ($\alpha=0,05$). A partir da aplicação desses três métodos, obteve-se a indicação que o melhor modelo de previsão do módulo seria com todas as variáveis, ou seja, a “técnica de seleção automática” indicou as mesmas variáveis para o modelo que a “técnica de todos os modelos possíveis”. Vale frisar que para prever o modelo de estimativa do módulo de elasticidade do concreto utilizaram-se 75% dos dados e para a validação do modelo foram utilizados os 25% dos dados restantes, esses dados estão apresentados no Apêndice B. A separação dos dados pertencentes a cada uma das porcentagens ocorreu de maneira aleatória, por meio de um sorteio realizado *online* pelo *site* Sorteador (<https://sorteador.com.br/>). De acordo com Batista (2004), a divisão dos dados em duas amostras por meio da seleção aleatória de observações é uma das abordagens básicas para a validação de modelos de regressão. Esses procedimentos foram realizados para garantir que os dados para a formulação do modelo não fossem os mesmos dados utilizados para a validação,

permitindo, assim, fazer comparativos entre os erros estimados pelo modelo desta pesquisa e demais normas e modelos conhecidos na literatura.

Após a seleção das variáveis para o modelo de regressão linear múltipla, realizou-se uma série de critérios para a escolha do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto, em que se adotou para a validação o modelo que melhor se ajustou aos dados e apresentou menores erros de estimativa. Conforme Johnson e Wichern (2002), a validação do modelo é imprescindível para que ele possa ser utilizado na inferência de valores para uma variável dependente, pois é necessário que ele satisfaça a alguns pressupostos estatísticos, objetivando obter avaliações não tendenciosa, eficientes e consistentes.

Dessa forma, os valores estimados pelo modelo de regressão foram avaliados a partir do erro padrão de estimativa (EPE) (Equação 4.1), que representa a distância média dos pontos de dados da linha de regressão, do erro médio (EM) (Equação 4.2), a raiz do erro quadrático médio (REQM) (Equação 4.3) e o erro médio absoluto (EMA) (Equação 4.4). Já a qualidade do ajuste obtida pelos modelos foi determinada pelo coeficiente de determinação (R^2) (Equação 4.5), que está relacionado à aproximação dos valores estimados em relação aos observados. Esta aproximação se obtém pelo índice de concordância (d) (Equação 4.6) (WILLMOTT *et al.*, 1985), seus valores devem estar no intervalo de zero a um, que significa nenhuma concordância e concordância perfeita, respectivamente. O desempenho do modelo também foi avaliado pelo índice de confiança (c), (Equação 4.7), em que r é o coeficiente de correlação simples de Person (Equação 4.8) e d é o índice de concordância. Conforme Camargo e Sentelhas (1997), o coeficiente c é interpretado como ótimo ($c > 0,85$); muito bom ($0,75 < c \leq 0,85$); bom ($0,65 < c \leq 0,75$); mediano ($0,60 < c \leq 0,65$), sofrível ($0,50 < c \leq 0,60$), mau ($0,40 < c \leq 0,50$) e péssimo ($c \leq 0,40$).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - E_i)^2}{n - 1}}$$

Equação 4.1

$$EM = \frac{1}{n} \cdot \sum (O_i - E_i)$$

Equação 4.2

$$\text{REQM} = \sqrt{\frac{\sum (O_i - E_i)^2}{n}}$$

Equação 4.3

$$\text{EMA} = \frac{1}{n} \cdot \sum |O_i - E_i|$$

Equação 4.4

$$R^2 = \frac{(n \cdot \sum(O_i \cdot E_i) - \sum O_i \cdot \sum E_i)^2}{[n \cdot \sum(O_i^2 - (\sum O_i)^2)] \cdot [n \cdot \sum(E_i^2 - (\sum E_i)^2)]}$$

Equação 4.5

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(|O_i - E_i| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right]$$

Equação 4.6

$$r = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2}}$$

Equação 4.7

$$c = d \cdot r$$

Equação 4.8

Onde:

O_i - valor observado;

E_i - valor estimado;

\bar{O} - média dos valores observados

EPE- erro padrão de estimativa

EM- erro médio

REQM- raiz do erro quadrático médio

EMA- erro médio absoluto

R^2 - coeficiente de determinação

d- índice de concordância

r- coeficiente de correlação simples de Person

c- índice de confiança

4.6 APRESENTAÇÃO, TRATAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos por meio do programa experimental foram representados na forma de Tabelas e Gráficos, sendo então realizada a análise e a discussão dos mesmos. Esses resultados receberam tratamento estatístico com base na Análise de Variância (ANOVA) e Análise de Regressão Múltipla, permitindo, assim, a formulação do modelo para a previsão do módulo de elasticidade, a partir da identificação das variáveis e interações que influenciaram significativamente no módulo. O nível de confiança adotado nas análises foi de 95%. Para a operação e apresentação dessas análises foram utilizados os recursos do *software Statistica*, versão 12 e do *software Action*, versão 3.7.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos materiais e métodos descritos no capítulo 4. Os resultados completos de todas as misturas estão apresentados no Apêndice A.

A discussão dos resultados se deu com os valores obtidos para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto a partir das variáveis independentes selecionadas para o estudo e suas interações, como a relação água/cimento (a/c), módulo de elasticidade da rocha, diferentes volumes de pasta e a forma do agregado graúdo (apenas para diabásio e basalto).

Os resultados foram apresentados e analisados de acordo com as tipologias das rochas e as variáveis independentes selecionadas para o estudo, ou seja, analisou-se conjuntamente as rochas de diabásio e basalto, as quais tinham como variáveis independentes o volume de pasta, a relação a/c, a forma e o módulo de elasticidade (E_c) do agregado graúdo. Já as rochas de calcário e granito foram analisadas conjuntamente e tinham as mesmas variáveis independentes que as rochas de diabásio e basalto, exceto a forma do agregado graúdo.

Por meio das análises estatísticas, como a Análise de Variância (ANOVA), considerando um nível de confiança de 95%, pode-se identificar as variáveis e interações que se mostraram significativas estatisticamente e, plotá-las em gráficos para a melhor visualização do efeito isolado de cada uma e do efeito das interações.

Em seguida realizou-se um estudo para selecionar as variáveis que fariam parte do modelo de previsão do módulo. Após a seleção procedeu-se a Análise de Regressão Múltipla com as variáveis que se mostram estatisticamente significativas para o módulo, obtendo, assim, o modelo para a previsão do módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland.

Ainda, realizou-se a validação do modelo proposto por este estudo para estimar o módulo de elasticidade do concreto e os demais modelos propostos pelas normas e modelos conhecidos na literatura, a fim de verificar quais dos modelos analisados se mostraram mais adequados aos resultados experimentais.

5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO

Os resultados médios obtidos para a resistência à compressão do concreto, tanto para as misturas com rocha de diabásio quanto de basalto, estão apresentadas na Tabela 5.1. Já os

resultados para as rochas de calcário e granito são apresentados na Tabela 5.2. Os resultados individuais estão no Apêndice A.

Tabela 5. 1 - Resultados médios da Resistência à Compressão do concreto com as rochas de diabásio e basalto

Beneficiamento	Traço	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Com VSI	D25 - m4,5	37,7	0,44	1,16
	D35 - m4,5	50,9	0,25	0,49
	D45 - m4,5	59,2	0,55	0,93
Intermediário	D25 - m4,5	34,3	0,45	1,32
	D35 - m4,5	46,8	0,46	0,98
	D45 - m4,5	56,9	0,45	0,79
Sem VSI	D25 - m4,5	33,9	0,55	1,63
	D35 - m4,5	45,1	0,25	0,56
	D45 - m4,5	54,3	0,35	0,65
Com VSI	D25 - m6	34,3	0,45	1,31
	D35 - m6	45,6	0,42	0,91
	D45 - m6	56,8	0,55	0,97
Intermediário	D25 - m6	32,3	0,57	1,76
	D35 - m6	44,0	0,26	0,60
	D45 - m6	53,4	0,31	0,57
Sem VSI	D25 - m6	31,9	0,15	0,48
	D35 - m6	42,7	0,56	1,30
	D45 - m6	52,7	0,60	1,14
Com VSI	D25 - m7,5	31,7	0,40	1,27
	D35 - m7,5	43,6	0,50	1,15
	D45 - m7,5	53,7	0,60	1,12
Intermediário	D25 - m7,5	30,9	0,30	0,97
	D35 - m7,5	41,0	0,36	0,88
	D45 - m7,5	51,8	0,45	0,87
Sem VSI	D25 - m7,5	30,8	0,25	0,82
	D35 - m7,5	40,5	0,40	0,99
	D45 - m7,5	49,8	0,47	0,95
Com VSI	B25 - m4,5	38,2	0,46	1,20
	B35 - m4,5	48,5	0,36	0,74
	B45 - m4,5	59,9	0,20	0,33
Intermediário	B25 - m4,5	37,2	0,42	1,12
	B35 - m4,5	45,8	0,65	1,42
	B45 - m4,5	55,5	0,40	0,73
Sem VSI	B25 - m4,5	33,0	0,75	2,29
	B35 - m4,5	44,2	0,46	1,04
	B45 - m4,5	54,0	0,70	1,30

(continua)

Tabela 5.1 - Resultados médios da Resistência à Compressão do concreto com as rochas de diabásio e basalto (continuação)

Beneficiamento	Traço	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Com VSI	B25 - m6	35,7	0,56	1,56
	B35 - m6	44,9	0,31	0,68
	B45 - m6	57,2	0,46	0,80
Intermediário	B25 - m6	35,6	0,56	1,56
	B35 - m6	43,6	0,55	1,26
	B45 - m6	53,5	0,59	1,10
Sem VSI	B25 - m6	32,2	0,60	1,87
	B35 - m6	42,1	0,35	0,83
	B45 - m6	53,1	0,56	1,05
Com VSI	B25 - m7,5	33,4	0,42	1,25
	B35 - m7,5	43,0	0,31	0,71
	B45 - m7,5	54,7	0,40	0,73
Intermediário	B25 - m7,5	32,8	0,65	1,99
	B35 - m7,5	41,9	0,31	0,73
	B45 - m7,5	51,6	0,35	0,68
Sem VSI	B25 - m7,5	30,8	0,25	0,82
	B35 - m7,5	39,9	0,40	1,01
	B45 - m7,5	50,2	0,35	0,70

Tabela 5.2 - Resultados médios da Resistência à Compressão do concreto com as rochas de calcário e granito

Beneficiamento	Traço	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
Sem VSI	C25 - m4,5	34,2	0,45	1,32
	C35 - m4,5	44,9	0,67	1,48
	C45 - m4,5	53,6	0,47	0,88
	C25 - m6	32,3	0,35	1,09
	C35 - m6	42,5	0,35	0,83
	C45 - m6	51,7	0,60	1,17
	C25 - m7,5	30,2	0,40	1,32
	C35 - m7,5	39,5	0,65	1,65
	C45 - m7,5	48,8	0,66	1,34
	G25 - m4,5	33,3	0,45	1,36
	G35 - m4,5	43,1	0,47	1,10
	G45 - m4,5	53,0	0,67	1,26
	G25 - m6	31,8	0,31	0,96
	G35 - m6	40,9	0,60	1,47
	G45 - m6	50,2	0,67	1,33
	G25 - m7,5	29,9	0,56	1,86
	G35 - m7,5	38,9	0,70	1,81
	G45 - m7,5	48,1	0,45	0,94

Para possibilitar a avaliação da influência da relação água/cimento (a/c), do volume de pasta, da forma e do módulo de elasticidade do agregado graúdo e das interações entre essas variáveis sobre a resistência à compressão do concreto, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) para as rochas de diabásio e basalto, Tabela 5.3. Para avaliar a influência das mesmas variáveis, exceto a forma do agregado graúdo, realizou-se outra ANOVA com os resultados obtidos com as rochas de calcário e granito, Tabela 5.4. Considerou-se o nível de confiança de 95%.

Tabela 5. 3 - ANOVA: resistência à compressão do concreto - rochas de diabásio e basalto

Parâmetros do Modelo

R	R ²	R ajustado	SQ	GL	MQ	Teste F	p
0,996	0,993	0,989	97,12667	108	0,8993210	279,5199	0,000

Parâmetros	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
A: Volume de Pasta	575,0	2	287,5	1366,2	0,000000	S
B: Relação água/cimento (a/c)	11511,6	2	5755,8	27352,2	0,000000	S
C: Forma do agregado graúdo	390,0	2	195,0	926,7	0,000000	S
D: E _c da Rocha	2,0	1	2,0	9,6	0,002468	S
AxB	9,5	4	2,4	11,3	0,000000	S
AxC	20,6	4	5,2	24,5	0,000000	S
BxC	16,4	4	4,1	19,5	0,000000	S
AxD	5,3	2	2,7	12,6	0,000012	S
BxD	25,4	2	12,7	60,3	0,000000	S
CxD	5,9	2	2,9	14,0	0,000004	S
AxBxC	7,3	8	0,9	4,3	0,000156	S
AxBxD	1,6	4	0,4	1,8	0,125515	NS
AxCxD	0,5	4	0,1	0,6	0,631655	NS
BxCxD	18,3	4	4,6	21,8	0,000000	S
Erro	22,7	108	0,2			

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.

É possível observar na Tabela 5.3 que todas as variáveis (volume de pasta, relação a/c, forma do agregado graúdo e módulo de elasticidade da rocha) exerceram influência significativa para a resistência à compressão do concreto, bem como as interações entre essas variáveis, exceto as interações de terceira ordem entre:

- Volume de pasta x relação a/c x E_c da rocha;

- Volume de pasta x forma do agregado graúdo x E_c da rocha.

De acordo com o Teste F, a variável de maior significância é a relação a/c, seguida pelo volume de pasta, da forma do agregado e do tipo de rocha.

Tabela 5. 4 - ANOVA: resistência à compressão do concreto - rochas de calcário e granito

Parâmetros do Modelo

R	R²	R ajustado	SQ	GL	MQ	Teste F	p
0,998	0,997	0,995	10,54000	36	0,292778	688,6647	0,00

Fator	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
A: Volume de Pasta	178,0	2	89,0	303,9	0,000000	S
B: Relação água/cimento (a/c)	3230,6	2	1615,3	5517,1	0,000000	S
C: E_c da Rocha	12,7	1	12,7	43,4	0,000000	S
AxB	2,5	4	0,6	2,1	0,096432	NS
AxC	1,1	2	0,6	1,9	0,165673	NS
BxC	1,6	2	0,8	2,7	0,082499	NS
AxBxC	1,2	4	0,3	1,0	0,401778	NS
Erro	10,5	36	0,3			

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.

Observa-se na Tabela 5.4 que todas as variáveis (volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha) influenciam na resistência à compressão do concreto, pois se mostraram estatisticamente significativas. Já as interações de segunda e terceira ordem não apresentam significância estatística para a resistência à compressão do concreto.

Assim como para as rochas de diabásio e basalto, a variável de maior significância é a relação a/c, seguida do volume de pasta e do tipo de rocha.

Nos próximos itens são apresentados gráficos comparativos do efeito isolado de cada variável independente na resistência à compressão do concreto, bem como dos efeitos das interações entre essas variáveis, conforme a significância estatística, considerando que foram admitidas apenas interações até a terceira ordem.

5.1.1 Efeito isolado da variável volume de pasta

Conforme as Tabelas 5.3 e 5,4 o volume de pasta exerceu influência na resistência à compressão do concreto para ambas as análises, pois se mostrou estatisticamente significativo.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os gráficos dos valores médios que mostram o efeito isolado do volume de pasta na resistência à compressão do concreto com o uso de agregados de diabásio e basalto, e com o uso de agregados de calcário e granito, respectivamente.

Figura 5. 1 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de diabásio e basalto

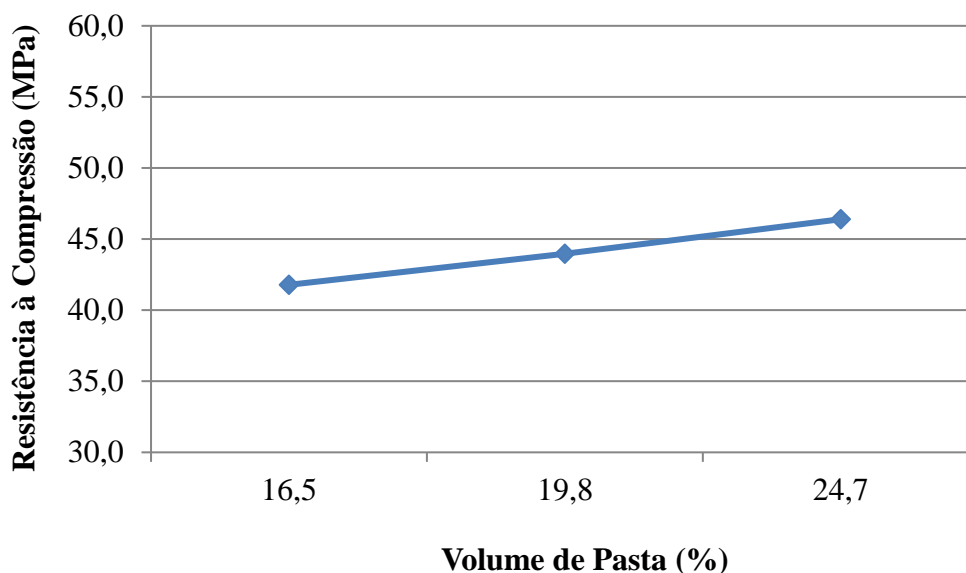
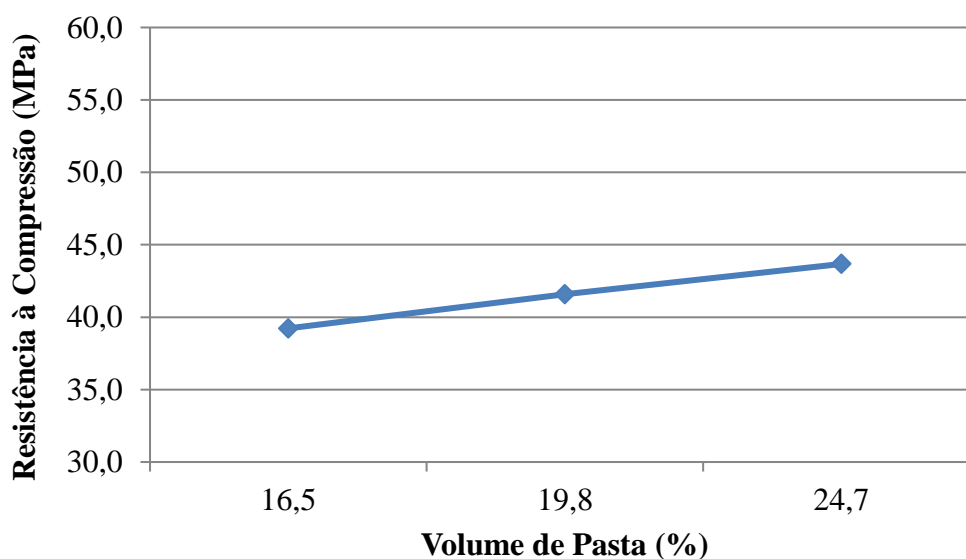


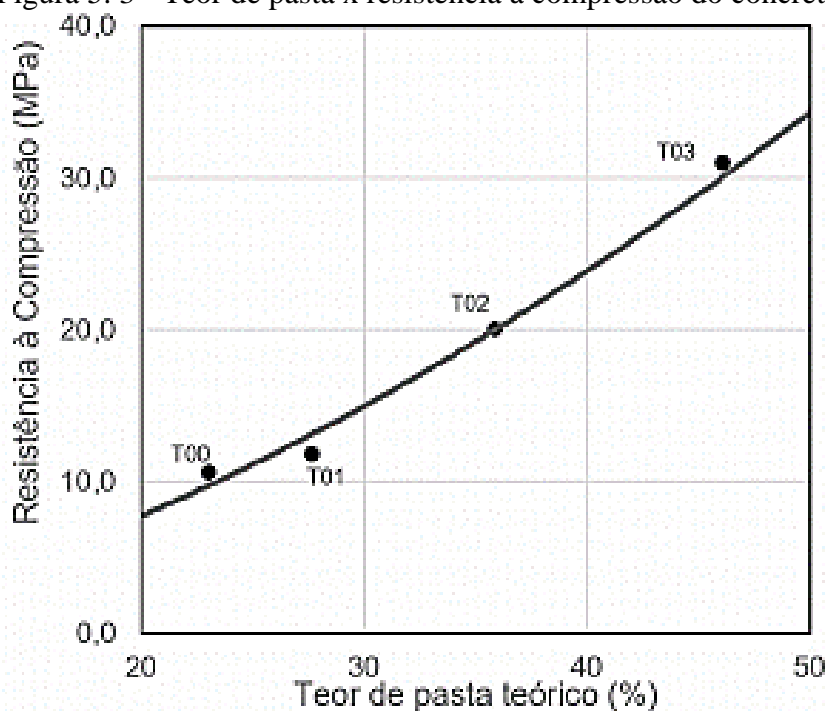
Figura 5. 2 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de calcário e granito



É possível afirmar que para uma mesma relação a/c, quanto maior o consumo de cimento (ou volume de pasta), maior a retração química (poros devido à retração química). Por outro lado, tem-se uma quantidade menor de zonas de transição agregado/matriz. A elevação na resistência à compressão do menor volume de pasta (16,5%) para o maior (24,7%) foi de 11,00% para as rochas de diabásio e basalto e, 16,18% para as rochas de calcário e granito.

O efeito do volume de pasta na resistência à compressão do concreto também foi evidenciado por Girardi (2018) que estudou seis diferentes teores de pasta, variando de 50,2% a 22,3%, e obteve um decréscimo na resistência à compressão de 6,22% quando diminuiu o teor de pasta. Ao estudar a influência de diferentes volumes de pasta sobre a resistência do concreto, Menegatti e Rocha (2019), também concluíram que a resistência do concreto cresce com o aumento do volume de pasta, como pode ser observado na Figura 5.3.

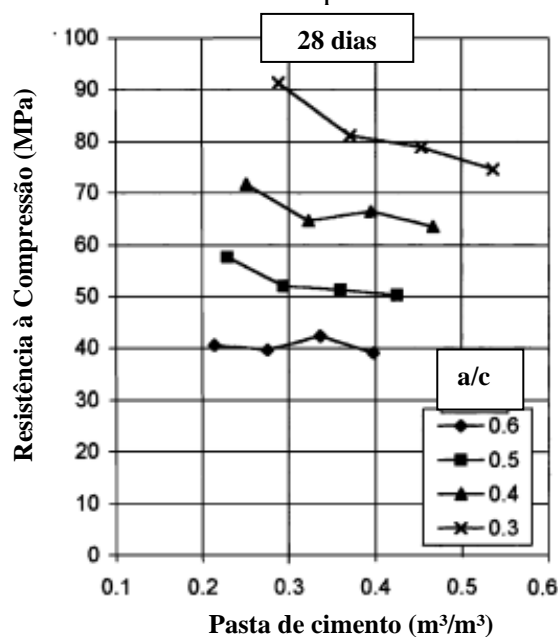
Figura 5.3 - Teor de pasta x resistência à compressão do concreto



Fonte: Adaptado de Menegatti e Rocha, 2019.

Kolias e Georgiou (2005) também concluíram que a resistência do concreto não depende apenas da relação água/cimento, mas também do volume de pasta. Em seus estudos observa-se que o comportamento ocorreu ao contrário, ou seja, quando o volume de pasta aumentou a resistência à compressão diminuiu, como pode ser observado na Figura 5.4, em que tem-se quatro relações água/cimento diferentes para concretos ensaiados aos 28 dias de idade.

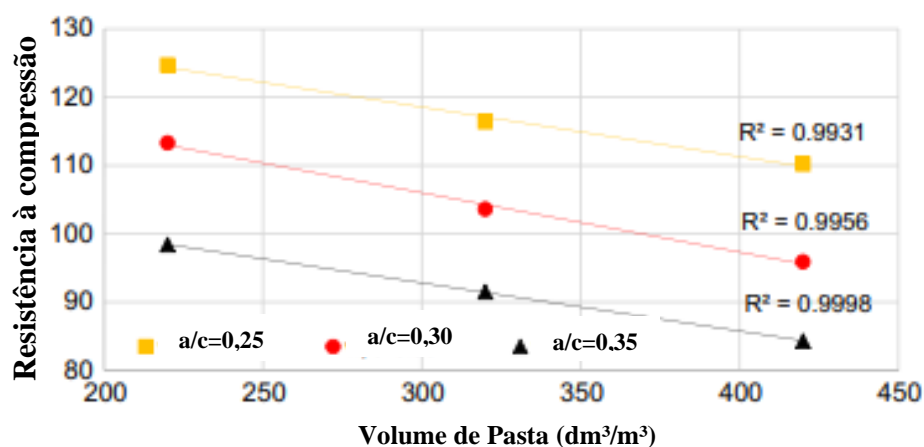
Figura 5. 4 - Resistência à compressão x volume de pasta



Fonte: Adaptado de Koliás e Georgiou, 2005.

Ainda conforme a Figura 5.4 se observa que a diminuição da resistência à compressão com o aumento do volume de pasta ocorre com mais intensidade em concretos que possuem relações água/cimento mais baixas. Da mesma forma, Piasta e Zarzycki (2017), quando estudaram a dependência da resistência à compressão com o volume de pasta de cimento, encontraram comportamento bastante semelhante, com os valores de resistência à compressão diminuindo com o aumento do volume de pasta, para concretos de mesma relação a/c, conforme mostra a Figura 5.5.

Figura 5. 5 - Dependência da resistência à compressão do concreto do volume de pasta



Fonte: Adaptado de Piasta e Zarzycki, 2017

No entanto, conforme os estudos realizados e os resultados obtidos com esta pesquisa, observa-se que alguns estão em concordância quanto ao comportamento das variáveis apresentadas por este trabalho e outros não. Pode-se afirmar que quando a resistência da pasta é baixa, ocorre prejuízo às propriedades mecânicas do concreto.

5.1.2 Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c)

Como era de se esperar, a relação água/cimento (a/c) apresentou influência estatística significativa para a resistência à compressão do concreto, como já evidenciado pela lei de Abrams (1918). Esse fato pode ser observado para todos os resultados, independentemente do tipo de rocha utilizado (Tabelas 5.3 e 5.4). Nos gráficos das Figuras 5.6 e 5.7, está representado o efeito isolado da variável relação a/c sobre a resistência à compressão do concreto para as rochas de diabásio e basalto e calcário e granito, respectivamente.

Figura 5. 6 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de diabásio e basalto

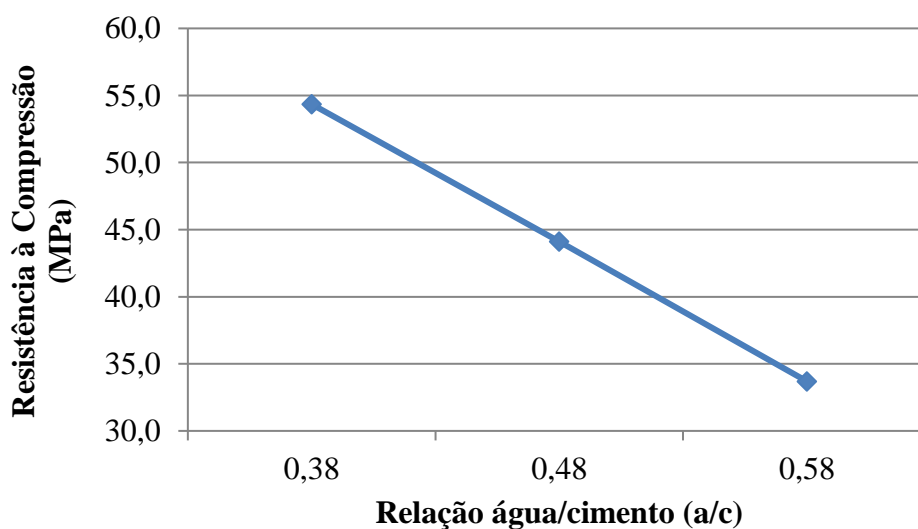
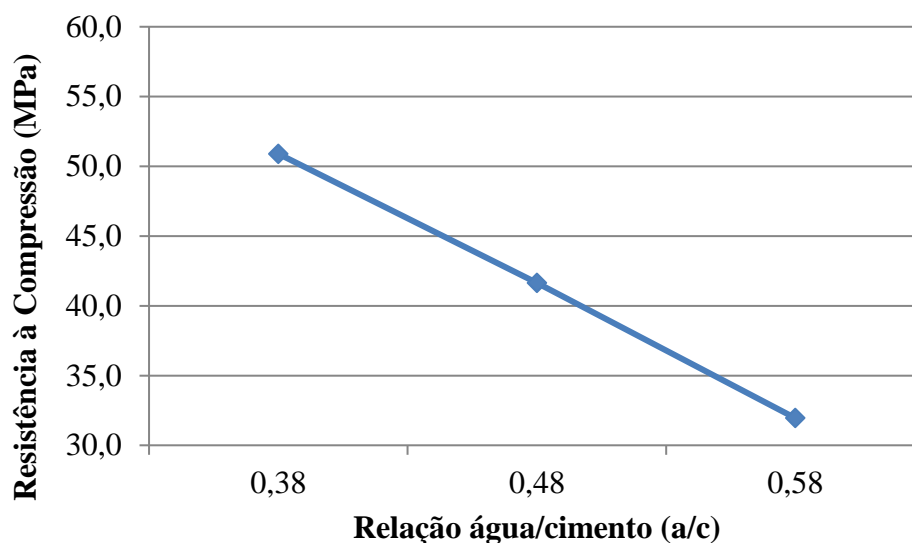


Figura 5. 7 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de calcário e granito

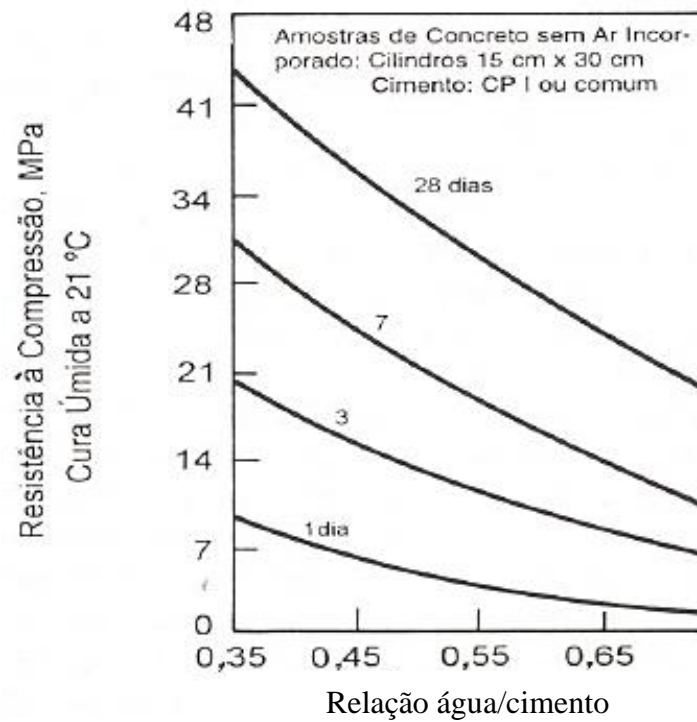


Por meio das Figuras 5.6 e 5.7 pode-se confirmar que a relação água/cimento (a/c) é inversamente proporcional à resistência à compressão do concreto, ou seja, quanto maior a relação a/c menor tende a ser a resistência do concreto, princípio básico da tecnologia do concreto. Para os concretos com rochas de diabásio e basalto, o decréscimo de resistência com o aumento da relação a/c 0,38 para 0,48 foi de 18,93%, e de 0,48 para 0,58, 23,58%. Já para os concretos com rochas de calcário e granito observa-se semelhança de comportamento, com reduções nas resistências em 18,27% e 23,08%, respectivamente.

Piasta e Zarzycki (2017) estudaram três relações água/cimento (a/c) 0,25, 0,30 e 0,35, e concluíram que aumentando a relação a/c a resistência à compressão do concreto reduziu em 8% e 13,9% para a/c 0,25-0,30 e a/c 0,30-0,35, respectivamente. No estudo de Girardi (2018), com quatro relações a/c diferentes (0,41, 0,51, 0,68 e 1,02), traço em massa de 1:5 e idade de 28 dias do concreto, obteve reduções de resistências com o aumento das relações a/c em 25,75%, 22,80% e 30,46%, respectivamente. Nunes (2005) obteve em seus resultados, quando analisou a influência da relação a/c na resistência dos concretos para a idade de 28 dias, um decréscimo de resistência de 44% quando aumentou a relação a/c de 0,4 para 0,6.

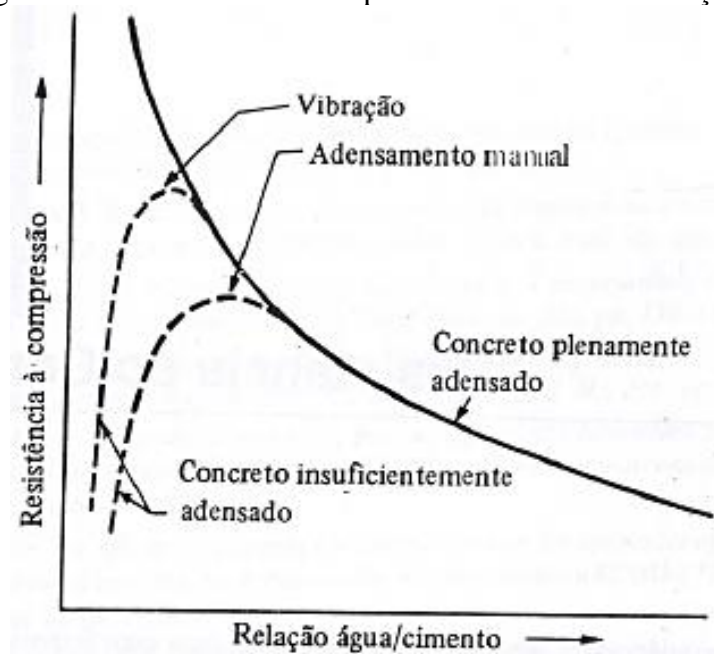
A evidência da dependência da resistência à compressão do concreto x relação a/c já foi estudada e apresentada há muitos anos atrás, por Abrams (1918). Nas Figuras 5.8 e 5.9 é possível observar esse comportamento ilustrado nos livros clássicos de tecnologia do concreto.

Figura 5. 8 - Influência da relação água/cimento (a/c) na resistência do concreto



Fonte: Adaptado de Metha e Monteiro, 1993

Figura 5. 9 - Resistência à compressão do concreto x relação a/c



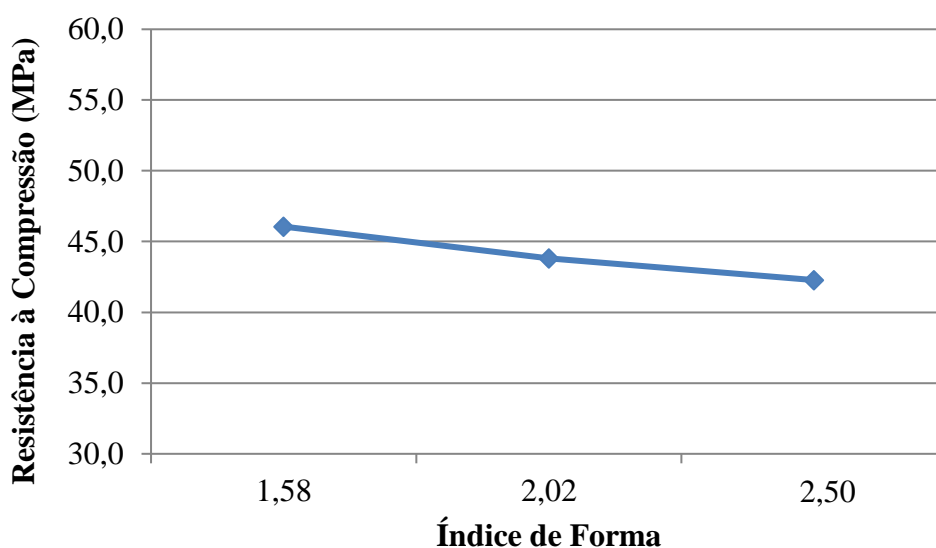
Fonte: Adaptado de Neville, 1997

5.1.3 Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo

A variável forma do agregado graúdo apresentou-se estatisticamente significativa para a resistência à compressão do concreto para as misturas produzidas com agregados de diabásio e basalto, já que para os demais agregados (calcário e granito) não se estudou esta variável.

A Figura 5.10 mostra o efeito isolado da variável forma para a resistência à compressão.

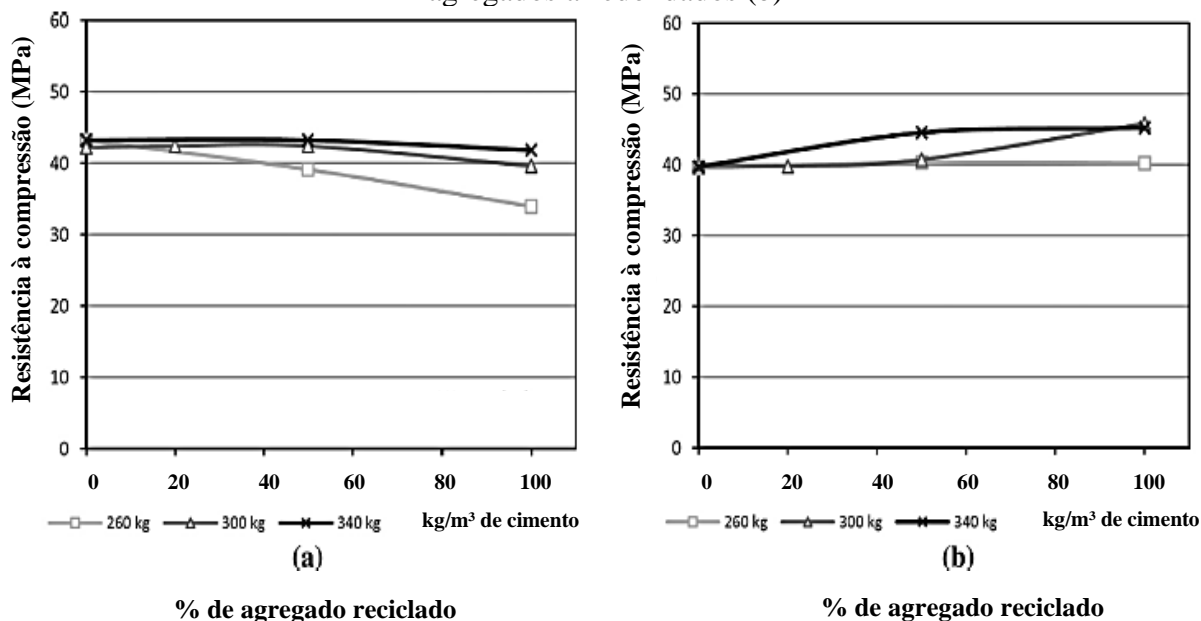
Figura 5. 10 - Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto



A Figura 5.10 permite inferir que à medida que o índice de forma aumenta, a resistência à compressão do concreto diminui. A elevação do índice de forma de 1,58 para 2,02 ocasionou uma redução da resistência do concreto em 4,99%, e quando aumentou-se o índice de 2,02 para 2,50 a diminuição da resistência foi de 3,42%. Esse comportamento também foi evidenciado por diferentes autores (OLIVEIRA et al., 2000; ARNDT et al., 2007; MENDES, 2008; LASERNA e MONTERO, 2016; SILVA et. al., 2017; HICKEL et. al., 2018), podendo ser explicado devido a facilidade de formação de um filme de água junto as paredes do agregado (exsudação interna), enfraquecendo a ligação com a pasta quando se utiliza agregados de forma lamelar.

As pesquisas realizadas por Laserna e Montero (2016) verificaram a influência da forma do agregado graúdo reciclado (britados e arredondados) sobre a resistência à compressão do concreto (Figuras 5.11 – a e b, respectivamente), em que utilizaram diferentes consumos de cimento e porcentagens de agregados reciclados

Figura 5. 11 – Resistência à compressão do concreto com agregados reciclados britados (a) e agregados arredondados (b)

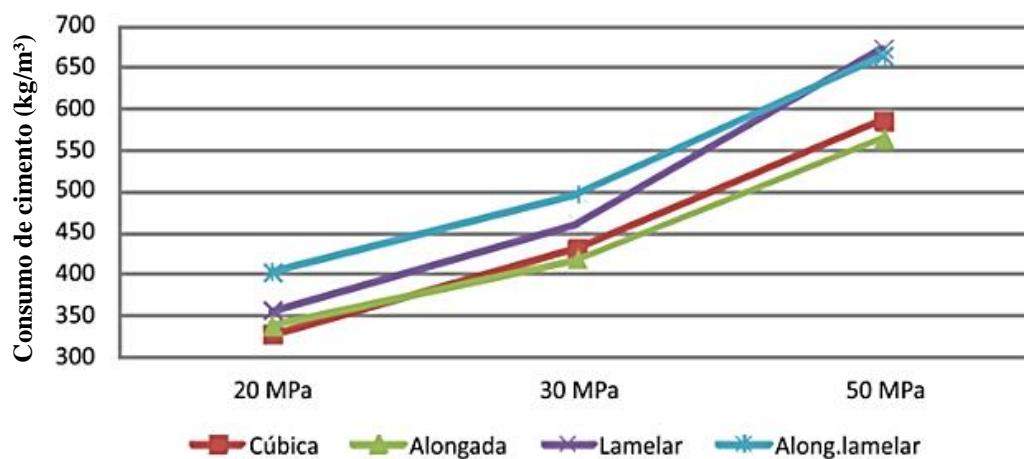


Fonte: Adaptado de Laserna e Montero, 2016

Observa-se na Figura 5.11 que os concretos com agregados reciclados arredondados (Figura 5.11- b) tenderam para uma maior resistência, principalmente para consumos de cimento menores, quando comparado com os concretos com agregados reciclados britados (Figura 5.11- a).

Silva e Geyer (2018) estudaram 4 formas diferentes de agregado graúdo (cúbica, alongada, lamelar e alongada.lamelar) com índices de forma 1,52, 2,10, 2,71 e 6,07, respectivamente. Os autores compararam o consumo de cimento x resistência à compressão x forma do agregado graúdo, conforme pode ser observado na Figura 5.12.

Figura 5. 12 - Relação consumo de cimento x resistência à compressão x forma do agregado



Adaptado de Silva e Geyer, 2018.

Na Figura 5.12 observa-se que os maiores consumos de cimento foram para os agregados graúdos com formas alongada.lamelar e lamelar, e que a forma do agregado graúdo apresenta maior significância para o concreto quando se tem resistências maiores. Esse estudo permite inferir que, a forma equidimensional tem como características maior quantidade de arestas que apresentam aderência mais elevada entre pasta de cimento/agregado e, conseqüentemente maior compactidade.

5.1.4 Efeito isolado da variável E_c da rocha

Conforme as Análises de Variância (Tabelas 5.3 e 5.4), o módulo de elasticidade da rocha (E_c) apresentou influência significativa para a resistência à compressão do concreto para ambas as análises, ou seja, quando se utilizou agregados de diabásio e basalto e, calcário e granito. As Figuras 5.13 e 5.14 permitem observar o efeito isolado da variável E_c da rocha na resistência do concreto.

Figura 5. 13 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto

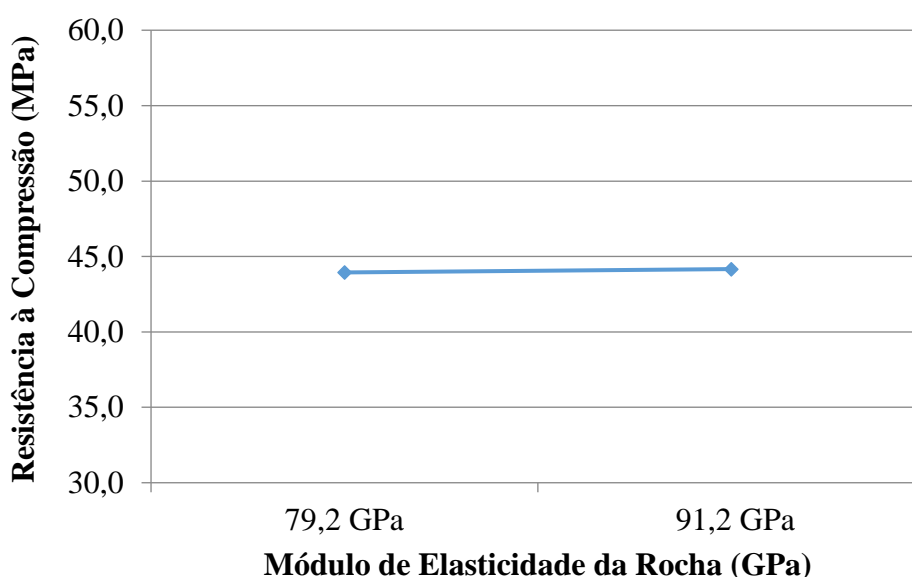
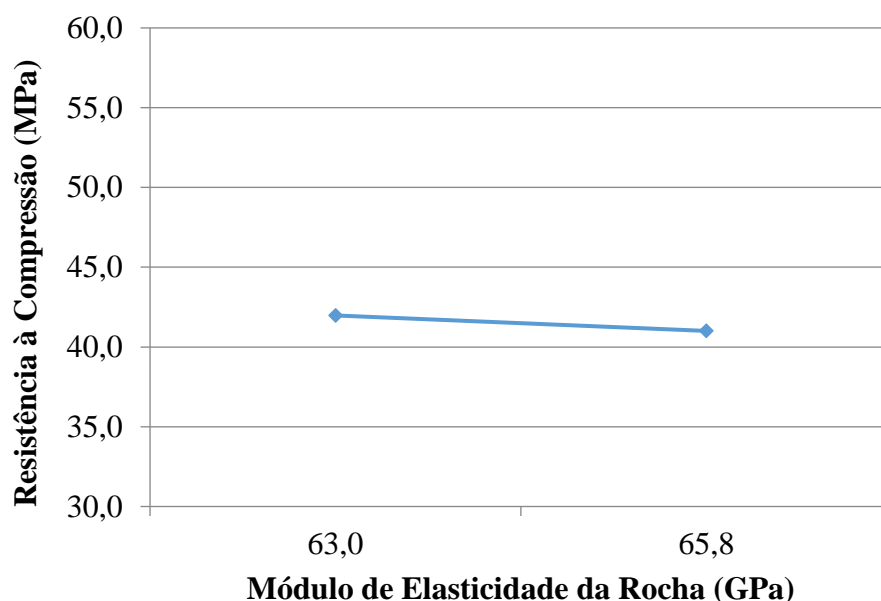


Figura 5. 14 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de calcário e granito

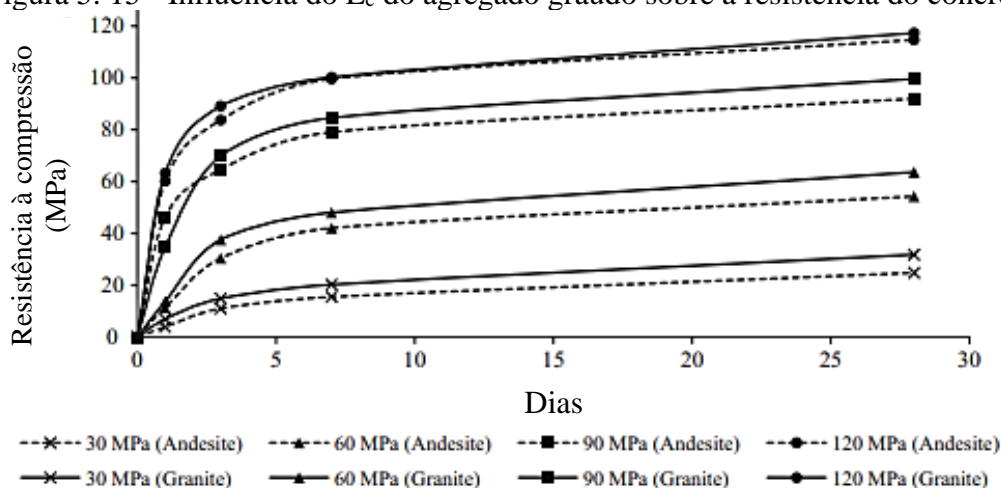
Na Figura 5.13 tem-se um leve aumento da resistência à compressão com agregado graúdo de maior módulo de elasticidade, ou seja, de 79,2 GPa para 91,2 GPa, em que os mesmos correspondem às rochas de diabásio e de basalto, respectivamente. Esse aumento foi muito pequeno, 0,68%. Vale frisar que essas rochas, diabásio e basalto, apresentaram resistência à compressão de 174,9 MPa e 108,3 MPa, respectivamente. Já na Figura 5.14, com as rochas de calcário e granito, 63 GPa e 65,8 GPa, respectivamente, a resistência do concreto apresentou redução de 2,38% quando do aumento do módulo de elasticidade da rocha, em que a resistência das mesmas foram 87,7 MPa e 80,2 MPa, respectivamente. Dessa forma, pode-se inferir que mesmo a avaliação estatística estar indicando significância para a variável módulo de elasticidade da rocha, a mesma não apresenta grande importância no âmbito técnico, considerando que a Análise de Variância apontou pelo teste F menor impacto que as demais variáveis.

Na literatura existem outras pesquisas que evidenciam esses comportamentos como as de Gidrão, 2015; Beushausen e Dittmer, 2015; Bilesky, 2016; Santos *et al.*, 2017 e Tibbetts *et al.*, 2018, entre outras.

Beushausen e Dittmer (2015) estudaram concretos com dois tipos de agregados graúdos, andesito e granito, e os resultados mostraram que os maiores valores de resistência à compressão foram obtidos para os concretos com agregados de granito (Figura 5.15). A explicação para este comportamento, conforme os autores, é devido ao maior módulo de elasticidade do andesito, o que provavelmente resulta em maiores concentrações de tensão na

interface pasta-agregado. Porém não foi identificado pelos autores qual o valor do módulo de elasticidade das rochas. Wittmann (2002) e Kovler e Bentur (2009), também observam comportamento semelhante.

Figura 5. 15 - Influência do E_c do agregado graúdo sobre a resistência do concreto



Fonte: Adaptado de Beushausen e Dittmer, 2015.

5.1.5 Interações

Além das variáveis principais, algumas interações entre elas também se mostraram estatisticamente significativas para a resistência à compressão do concreto. Mas conforme o valor de teste F, o impacto das interações é menor que das variáveis isoladas.

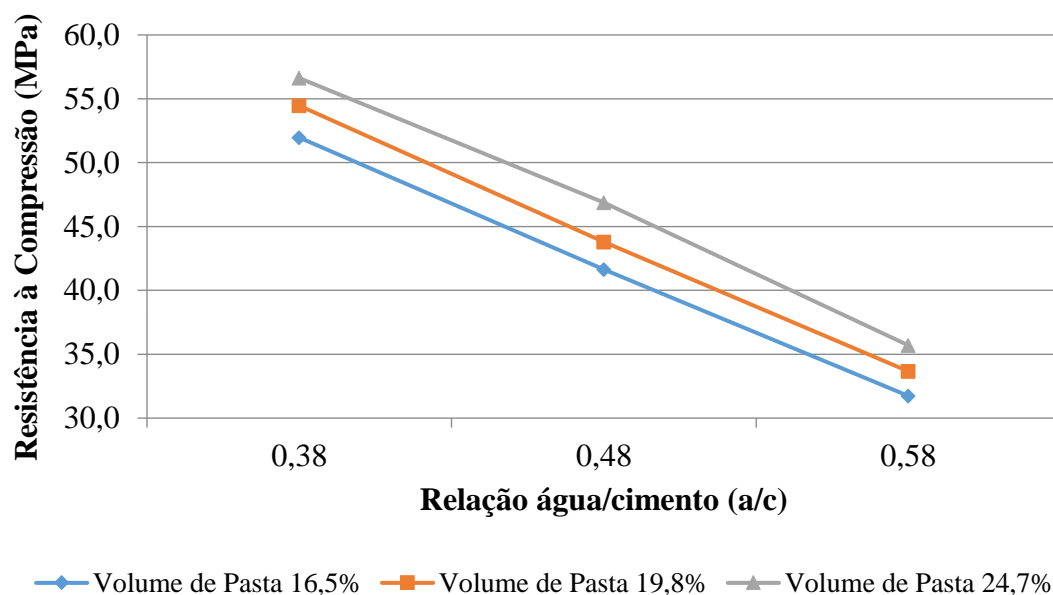
Conforme apresentado nas Tabelas 5.3 e 5.4, as interações entre as variáveis só se mostraram estatisticamente significativas para os concretos produzidos com rochas de diabásio e basalto.

Com o intuito de demonstrar a influência das interações entre as variáveis apresenta-se a seguir o efeito das interações de segunda e terceira ordem, conforme a significância estatística.

5.1.5.1 Efeito da interação das variáveis volume de pasta e relação água/cimento (a/c)

A interação entre o volume de pasta e a relação a/c se mostrou significativa para a resistência à compressão do concreto com as rochas de diabásio e basalto (Tabela 5.3). Para permitir a observação dessa evidência, plotou-se o gráfico do efeito da interação (Figura 5.16).

Figura 5. 16 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e a relação a/c: rochas de diabásio e basalto

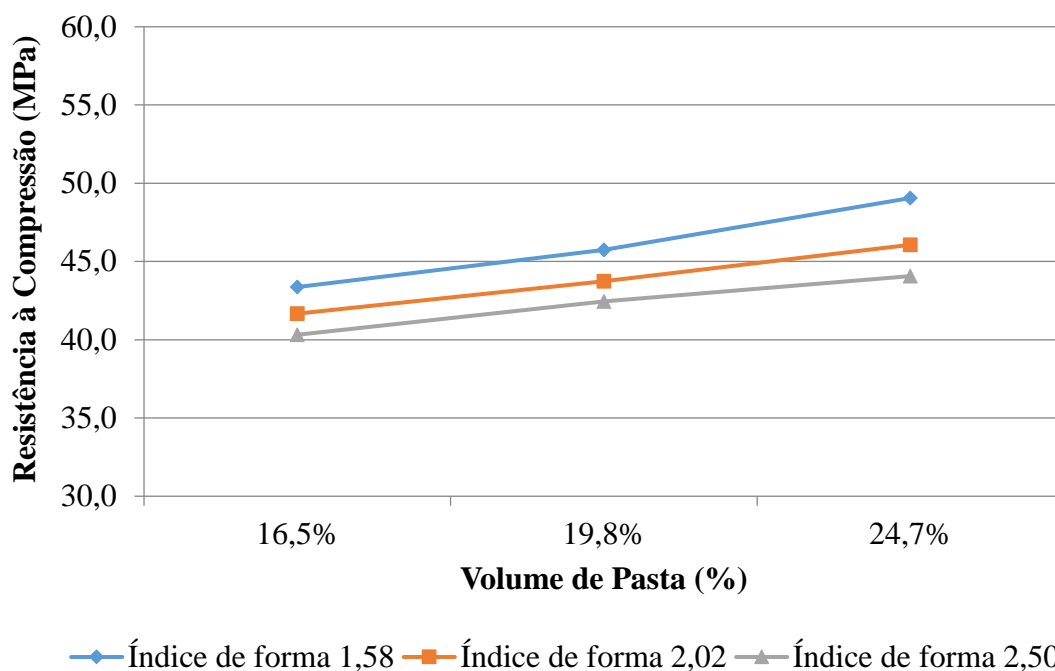


Observa-se no gráfico da Figura 5.16 que para todas as relações a/c (0,38, 0,48 e 0,58), quanto maior o volume de pasta, maior tende a ser a resistência do concreto. Ainda, pode-se inferir que a variável volume de pasta apresenta maior importância para relações a/c mais baixas, já que os maiores afastamentos entre os valores médios de resistência à compressão do concreto foram obtidos com relações a/c 0,48 e 0,38. Esse comportamento também foi verificado por Monteiro e Zimmerman (1997) e Xie *et al.* (2015).

5.1.5.2 Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo

De acordo com a análise de variância (Tabela 5.3), a interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo se mostrou estatisticamente significativa. Para permitir a visualização deste efeito é apresentado o gráfico da Figura 5.17.

Figura 5. 17 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto

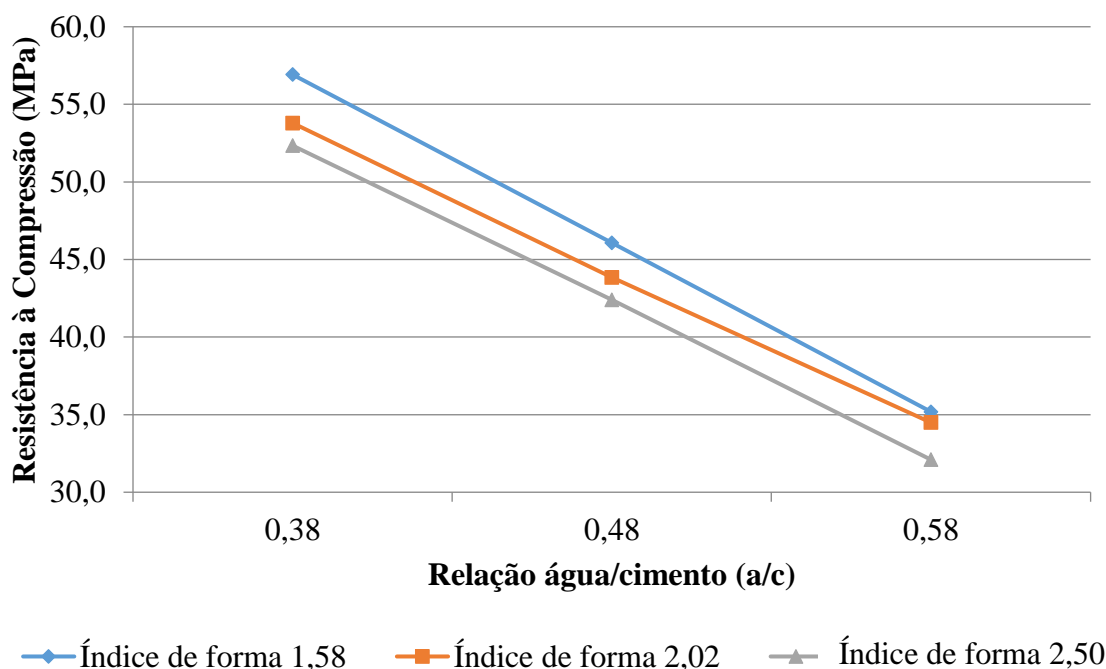


A Figura 5.17 permite inferir que quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior tende a ser a resistência à compressão do concreto para todos os volumes de pasta estudados. Ainda, pode-se afirmar que a forma do agregado graúdo possui maior importância para a resistência à compressão do concreto quando se tem volumes de pasta maiores, pois os afastamentos entre os valores médios de resistência à compressão para os volumes de pasta 19,8% e 24,7% são maiores que para o volume de pasta de 16,5%.

5.1.5.3 Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo

A interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo se mostrou estatisticamente significativa para a resistência à compressão do concreto (Tabela 5.3). Dessa maneira, plotou-se o gráfico da Figura 5.18 para a visualização deste efeito.

Figura 5. 18 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto



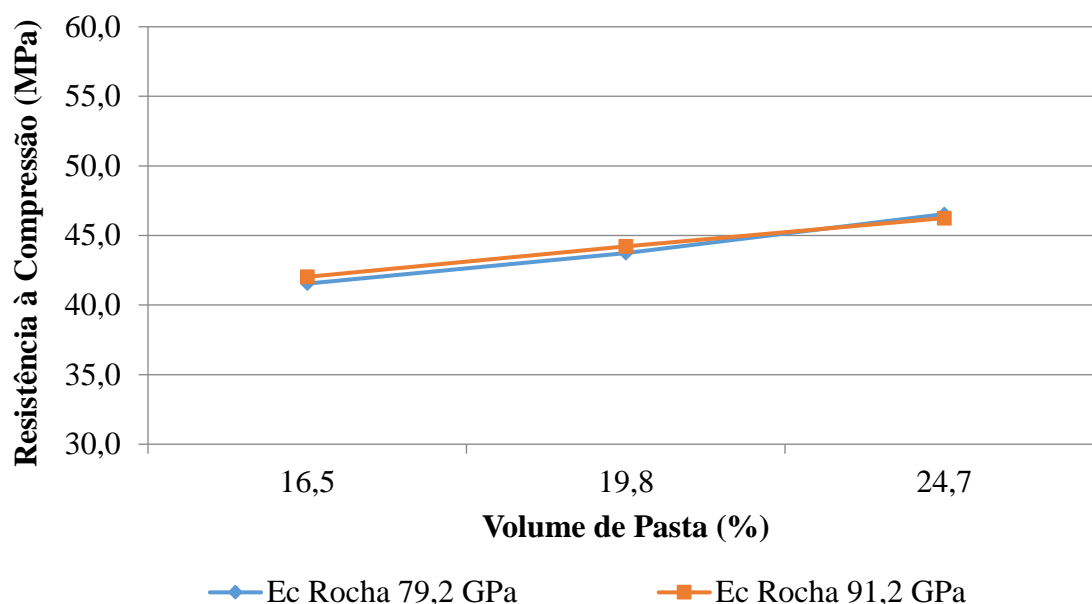
Conforme a Figura 5.18 observa-se que quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior a resistência à compressão do concreto para todas as relações água/cimento (a/c) analisadas.

A significância estatística desta interação provavelmente está ocorrendo devido ao índice de forma 2,02, que se mostra paralelo com as linhas dos demais índices para as relações a/c 0,38 e 0,48, mas para a relação 0,58 ele tende para próximo dos valores médios obtidos com o índice de forma 1,58. Esse comportamento talvez possa ser explicado devido a composição do índice de forma 2,02, ou também chamado de beneficiamento do agregado graúdo intermediário, entre VSI e sem VSI, ter sido realizada em laboratório.

5.1.5.4 Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha

Por meio da análise estatística (Tabela 5.3) verificou-se que a interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha se mostrou estatisticamente significativa para a resistência à compressão do concreto. Para permitir a observação deste efeito foi produzido o gráfico da Figura 5.19.

Figura 5. 19 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto



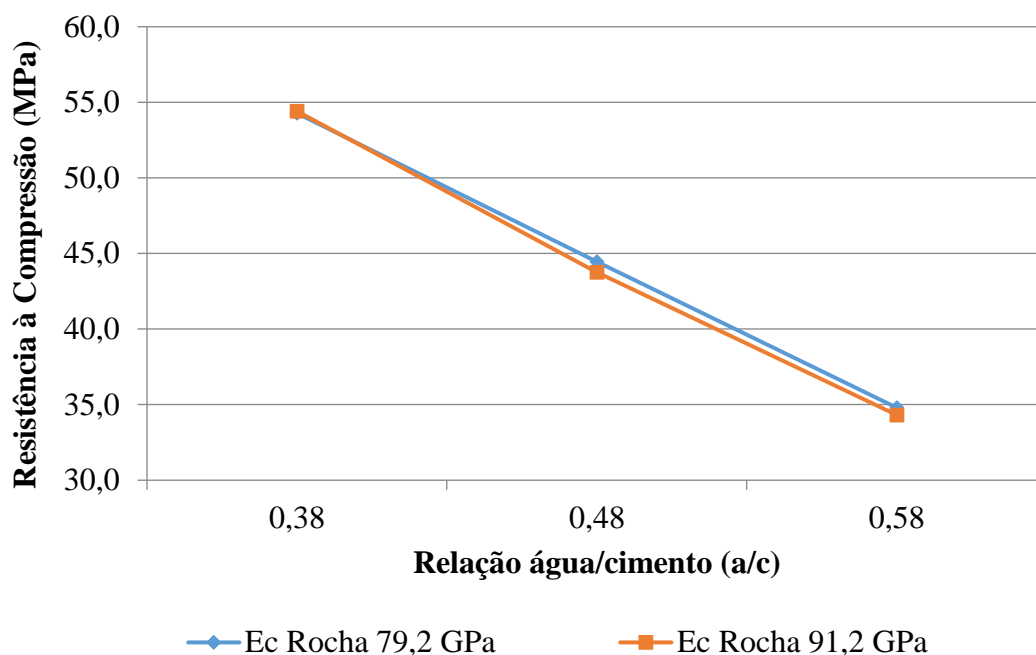
Na análise do efeito das interações das variáveis (Figura 5.19) observa-se que a significância estatística, acusada na análise de variância (ANOVA), é devido à mudança de comportamento dos valores médios da rocha de basalto (E_c 91,2 GPa), em que para os volumes de pasta 16,5% e 19,8% ela apresenta os maiores valores de resistência à compressão do concreto, já quando aumenta-se o volume de pasta para 24,7% o comportamento se inverte, ou seja, a rocha de diabásio (E_c 79,2 GPa) apresenta resistência do concreto minimamente maior.

Apesar da interação entre as variáveis volume de pasta e E_c da rocha ter sido avaliada como significativa pela ANOVA, do ponto de vista prático não se pode afirmar que essa interação tenha importância para a resistência à compressão do concreto.

5.1.5.5 Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha

A interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha apresentou-se estatisticamente significativa para a resistência à compressão do concreto quando avaliadas por meio da análise de variância (ANOVA). Esse efeito pode ser observado na Figura 5.20.

Figura 5. 20 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto



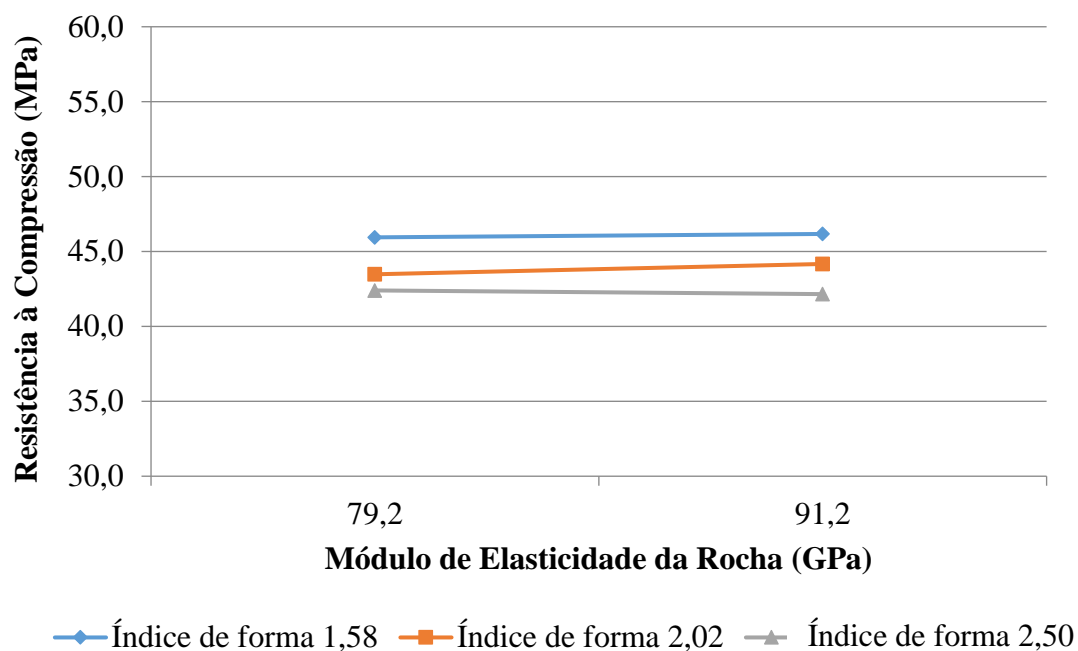
Assim como mencionado no item anterior, na Figura 5.20 observa-se semelhança de comportamento entre as análises, ou seja, no aspecto prático não se pode afirmar que a interação das variáveis relação a/c e E_c da rocha sejam significativas para a resistência à compressão do concreto, apesar da análise estatística estar afirmando tal fato. Essas pequenas diferenças de resistência à compressão que estão ocorrendo com os tipos de rocha (diabásio= E_c 79,2 GPa e basalto= E_c 91,2 GPa) para as relações a/c 0,48 e 0,58 são muito pequenas, e podem ser explicadas até mesmo por procedimentos de ensaio.

5.1.5.6 Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha

Verificou-se pela análise de variância (ANOVA) da Tabela 5.3 que a interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha se mostrou significativa para a resistência à compressão do concreto.

A Figura 5.21 permite observar o efeito da interação das variáveis.

Figura 5. 21 - Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto



Observa-se na Figura 5.21 que quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior tende a ser a resistência à compressão do concreto, indiferente do tipo de rocha, diabásio, $E_c = 79,2$ GPa ou basalto, $E_c = 91,2$ GPa.

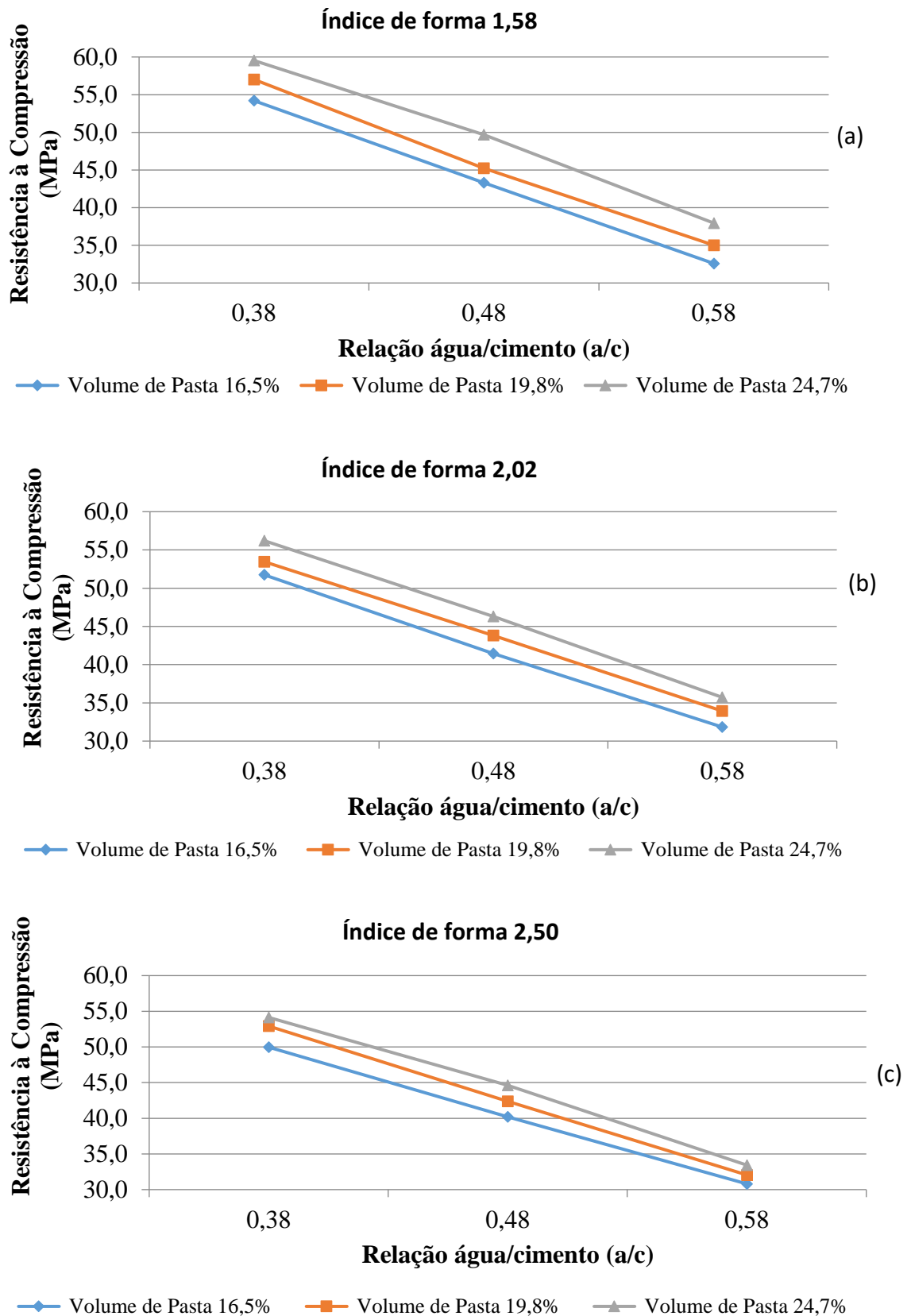
Possivelmente a análise estatística afirma a significância da interação dessas variáveis pelo fato do índice de forma 2,02 estar tendendo aos valores médios do índice de forma 2,50 para a rocha de diabásio e para a rocha de basalto estar mais próximo dos valores médios do índice de forma 1,58. Conforme explicado no item 5.1.5.3, esse comportamento pode estar relacionado com a composição do índice de forma 2,02 ter sido realizada em laboratório e não obtida neste formato de grão da pedreira, como os outros dois índices de forma (1,58 e 2,50).

5.1.5.7 Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo

Entre as interações das variáveis que se mostraram estatisticamente significativas tem-se também a interação de terceira ordem das variáveis volume de pasta, relação a/c e forma do agregado graúdo.

Para permitir a observação deste efeito plotaram-se os gráficos da Figura 5.22, em que se relacionou o volume de pasta e a relação a/c para cada uma das formas do agregado graúdo.

Figura 5. 22 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto (a) índice de forma 1,58; (b) índice de forma 2,02; (c) índice de forma 2,50



Os gráficos da Figura 5.22 permitem afirmar que independente do índice de forma (1,58, 2,02 ou 2,50), quanto maior o volume de pasta, maior tende a ser a resistência à compressão do concreto para todas as relações água/cimento (a/c). Ainda, observa-se que o volume de pasta tem maior importância para o índice de forma menor (1,58) e também para a menor relação água/cimento (a/c), ou seja, a/c 0,38.

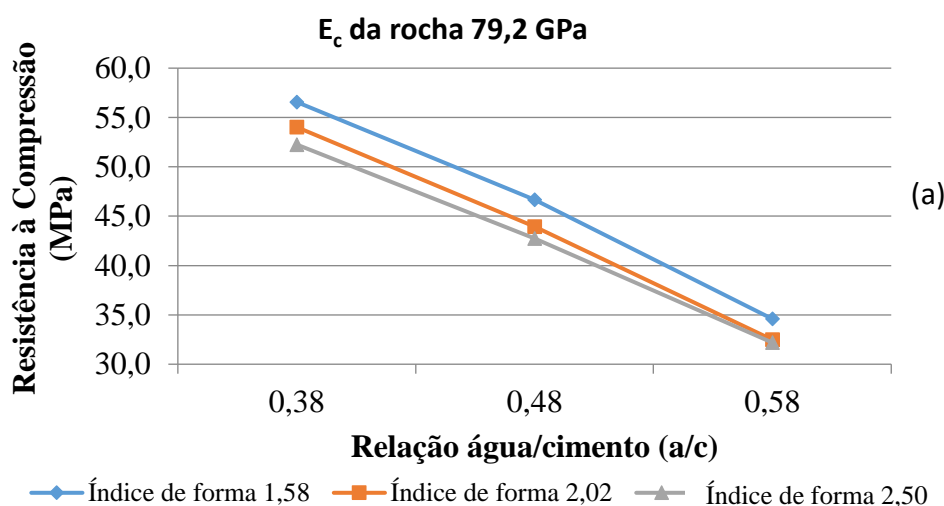
Como já apresentado anteriormente, percebe-se que mesmo sendo estatisticamente significativa a interação das variáveis, do ponto de vista prático essa influência tem pouca importância para a resistência à compressão do concreto.

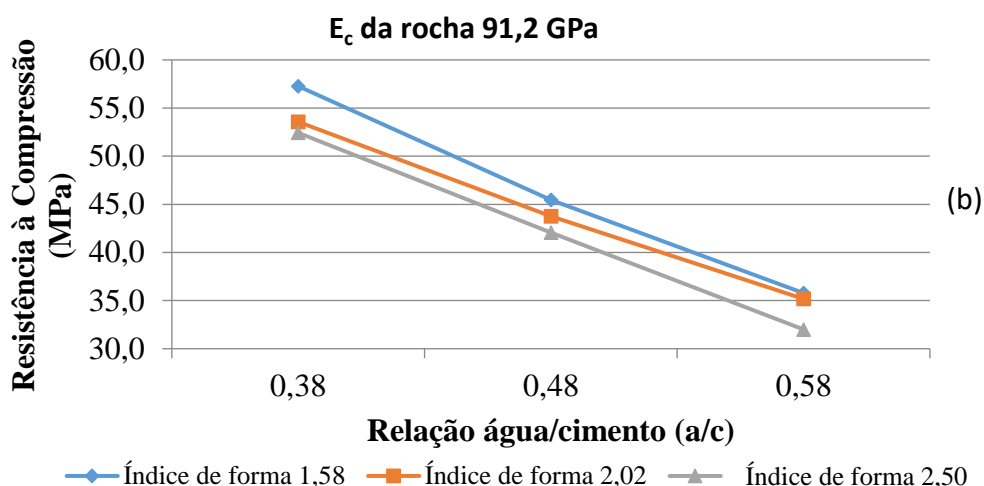
5.1.5.8 Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c), forma do agregado graúdo e E_c da rocha

A interação de terceira ordem das variáveis relação água/cimento (a/c), forma do agregado graúdo e E_c da rocha se apresentou significativa estatisticamente para a resistência à compressão do concreto (Tabela 5.3).

Para visualizar o efeito dessa influência apresentam-se os gráficos da Figura 5.23, em que está relacionada a relação a/c e a forma do agregado graúdo para cada uma das rochas, diabásio e basalto.

Figura 5. 23 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c), forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto (a) E_c 79,2 GPa e (b) E_c 91,2 GPa





Os gráficos da Figura 5.23 permitem inferir que para todas as relações água/cimento e indiferente do tipo de rocha, os concretos produzidos com menor índice de forma do agregado graúdo tendem a resultar em maior resistência à compressão.

É possível afirmar que a significância da interação possivelmente esteja ocorrendo devido ao comportamento dos resultados médios para o índice de forma 2,02, em que para a rocha de diabásio (E_c 79,2 GPa) e relação a/c 0,58, os valores médios de resistência tendem a ser muito próximos dos valores para o índice de forma 2,50. Já para a rocha de basalto (E_c 91,2 GPa), o comportamento dos valores para o mesmo índice, 2,02, ocorrem de forma diferente, ou seja, para a relação a/c 0,38 os valores tendem a ser próximos dos valores obtidos para os concretos com agregados de índice de forma 2,50, e quando se aumenta a relação a/c para 0,58, eles tendem a ficar próximos dos resultados com índice de forma 1,58. Assim como explicado em itens anteriores, essas tendências podem estar ocorrendo devido à composição do índice de forma 2,02 ter sido realizada em laboratório.

5.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Para avaliar o módulo de elasticidade do concreto procedeu-se de maneira semelhante como no item anterior, onde foi analisada a resistência à compressão do concreto.

Para permitir a observação da influência das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c), módulo de elasticidade da rocha e forma do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto, foram analisadas todas as variáveis para as rochas que tiveram três formas diferentes de agregado graúdo (diabásio e basalto), ou seja, beneficiamento

VSI, intermediário e sem VSI. Da mesma forma, de maneira conjunta, analisou-se as mesmas variáveis, exceto a forma do agregado graúdo, para as rochas de calcário e granito.

Os resultados médios obtidos para o módulo de elasticidade do concreto tanto para as misturas com rocha de diabásio quanto de basalto estão apresentadas na Tabela 5.5. Os resultados para as rochas de calcários e granito são apresentados na Tabela 5.6. Os resultados completos estão no Apêndice A.

Tabela 5.5 - Resultados médios do Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de diabásio e basalto

Beneficiamento	Traço	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
Com VSI	D25 - m4,5	39,0	0,30	0,77
	D35 - m4,5	42,1	0,44	1,04
	D45 - m4,5	43,1	0,40	0,94
Intermediário	D25 - m4,5	40,4	0,59	1,45
	D35 - m4,5	42,4	0,46	1,08
	D45 - m4,5	44,1	0,49	1,10
Sem VSI	D25 - m4,5	41,9	0,59	1,41
	D35 - m4,5	42,8	0,49	1,13
	D45 - m4,5	43,9	0,56	1,27
Com VSI	D25 - m6	44,6	0,43	0,96
	D35 - m6	46,6	0,44	0,95
	D45 - m6	47,2	0,30	0,63
Intermediário	D25 - m6	43,7	0,34	0,78
	D35 - m6	45,0	0,38	0,84
	D45 - m6	46,0	0,55	1,19
Sem VSI	D25 - m6	42,3	0,39	0,92
	D35 - m6	44,6	0,46	1,03
	D45 - m6	45,9	0,61	1,34
Com VSI	D25 - m7,5	45,9	0,51	1,10
	D35 - m7,5	48,1	0,34	0,71
	D45 - m7,5	50,7	0,49	0,97
Intermediário	D25 - m7,5	43,9	0,64	1,45
	D35 - m7,5	46,2	0,53	1,15
	D45 - m7,5	48,5	0,43	0,89
Sem VSI	D25 - m7,5	43,2	0,42	0,97
	D35 - m7,5	47,4	0,57	1,20
	D45 - m7,5	48,6	0,41	0,84
Com VSI	B25 - m4,5	40,0	0,52	1,29
	B35 - m4,5	43,3	0,48	1,10
	B45 - m4,5	44,7	0,50	1,12
Intermediário	B25 - m4,5	40,3	0,54	1,34
	B35 - m4,5	42,7	0,43	1,01
	B45 - m4,5	44,4	0,44	0,99

(continua)

Tabela 5.5 - Resultados médios do Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de diabásio e basalto (continuação)

Beneficiamento	Traço	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
Sem VSI	B25 - m4,5	39,6	0,39	0,99
	B35 - m4,5	42,6	0,46	1,07
	B45 - m4,5	42,9	0,52	1,21
Com VSI	B25 - m6	42,2	0,35	0,83
	B35 - m6	45,6	0,42	0,93
	B45 - m6	47,0	0,48	1,02
Intermediário	B25 - m6	42,8	0,44	1,04
	B35 - m6	45,0	0,75	1,67
	B45 - m6	46,4	0,55	1,19
Sem VSI	B25 - m6	40,9	0,56	1,36
	B35 - m6	44,0	0,71	1,61
	B45 - m6	45,0	0,46	1,02
Com VSI	B25 - m7,5	44,7	0,42	0,93
	B35 - m7,5	46,2	0,40	0,88
	B45 - m7,5	48,7	0,40	0,83
Intermediário	B25 - m7,5	45,0	0,66	1,46
	B35 - m7,5	46,0	0,58	1,26
	B45 - m7,5	48,0	0,68	1,41
Sem VSI	B25 - m7,5	43,1	0,72	1,67
	B35 - m7,5	45,1	0,51	1,14
	B45 - m7,5	46,6	0,48	1,03

Tabela 5.6 - Resultados médios do Módulo de Elasticidade do concreto com as rochas de calcário e granito

Beneficiamento	Traço	Módulo Médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
Sem VSI	C25 - m4,5	32,6	0,44	1,36
	C35 - m4,5	34,7	0,44	1,28
	C45 - m4,5	36,0	0,31	0,86
	C25 - m6	36,1	0,40	1,12
	C35 - m6	38,2	0,33	0,87
	C45 - m6	39,9	0,48	1,20
	C25 - m7,5	37,1	0,39	1,05
	C35 - m7,5	38,8	0,53	1,37
	C45 - m7,5	42,4	0,82	1,93
	G25 - m4,5	32,0	0,52	1,63
	G35 - m4,5	33,6	0,48	1,42
	G45 - m4,5	35,6	0,59	1,66
	G25 - m6	34,2	0,77	2,26
	G35 - m6	36,9	0,61	1,64
	G45 - m6	38,2	0,38	0,99
	G25 - m7,5	37,0	0,50	1,34
	G35 - m7,5	39,9	0,56	1,41
	G45 - m7,5	41,6	0,58	1,39

Objetivando avaliar a influência das variáveis independentes: relação água/cimento (a/c), volume de pasta, forma e módulo de elasticidade do agregado graúdo e das interações entre essas variáveis sobre o módulo de elasticidade do concreto, realizou-se a análise de variância (ANOVA), em que se considerou o nível de confiança de 95%. Nas Tabelas 5.7 e 5.8 são apresentadas as análises para as rochas de diabásio e basalto e para as rochas de calcário e granito, respectivamente.

Tabela 5. 7 - ANOVA: módulo de elasticidade do concreto - rochas de diabásio e basalto

Parâmetros do Modelo

R	R ²	R ajustado	SQ	GL	MQ	Teste F	p
0,985	0,971	0,961402	40,31500	162	0,248858	102,0423	0,000

Parâmetros	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
A: Volume de Pasta	640,5	2	320,3	1286,9	0,000000	S
B: Relação água/cimento (a/c)	523,8	2	261,9	1052,5	0,000000	S
C: Forma do agregado graúdo	40,2	2	20,1	80,7	0,000000	S
D: E _c da Rocha	17,6	1	17,6	70,6	0,000000	S
AxB	6,9	4	1,7	7,0	0,000033	S
AxC	33,4	4	8,4	33,6	0,000000	S
BxC	5,8	4	1,5	5,9	0,000195	S
AxD	11,8	2	5,9	23,7	0,000000	S
BxD	0,6	2	0,3	1,2	0,313673	NS
CxD	13,3	2	6,7	26,8	0,000000	S
AxBxC	11,3	8	1,4	5,7	0,000002	S
AxBxD	15,9	4	4,0	16,0	0,000000	S
AxCxD	19,7	4	4,9	19,8	0,000000	S
BxCxD	0,9	4	0,2	0,9	0,439180	NS
Erro	40,3	162	0,2			

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.

Conforme a Tabela 5.7 pode-se afirmar que todas as variáveis analisadas se apresentaram significativas para o módulo de elasticidade do concreto, exceto a interação de segunda ordem entre relação água/cimento (a/c) x E_c da rocha e a interação de terceira ordem entre relação água/cimento (a/c) x forma do agregado graúdo x E_c da rocha, que se mostraram não significativas estatisticamente para o módulo de elasticidade do concreto.

Diferente da resistência à compressão, a variável de maior significância para o módulo de elasticidade conforme o Teste F é o volume de pasta, seguido da relação água/cimento, da forma do agregado graúdo e, por fim, do tipo de rocha.

Tabela 5. 8 - ANOVA: módulo de elasticidade do concreto - rochas de calcário e granito

Parâmetros do Modelo

R	R ²	R ajustado	SQ	GL	MQ	Teste F	p
0,988	0,975	0,968	14,83000	54	0,274630	126,0513	0,000

Parâmetros	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
A: Volume de Pasta	355,31	2	177,66	646,9	0,000000	S
B: Relação água/cimento (a/c)	204,57	2	102,28	372,4	0,000000	S
C: E _c da Rocha	9,83	1	9,83	35,8	0,000000	S
AxB	5,33	4	1,33	4,9	0,002045	S
AxC	9,14	2	4,57	16,6	0,000002	S
BxC	1,07	2	0,54	2,0	0,151290	NS
AxBxC	3,25	4	0,81	3,0	0,027828	S
Erro	14,83	54	0,27			

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 Tabela 5.8 permite afirmar que todas as variáveis e suas interações apresentam significância estatística sobre o módulo de elasticidade do concreto quando do uso de agregados graúdos de calcário e granito, exceto a interação de segunda ordem entre o volume de pasta x E_c da Rocha, que se mostrou não significativo, para o módulo de elasticidade do concreto.

Assim como para as rochas de diabásio e basalto, a variável de maior significância é o volume de pasta, seguido da relação água/cimento e do tipo de rocha.

Nos itens a seguir são apresentados os gráficos comparativos do efeito isolado de cada variável e suas interações no módulo de elasticidade do concreto, conforme a significância estatística.

5.2.1 Efeito isolado da variável volume de pasta

Conforme as análises de variâncias (Tabelas 5.7 e 5.8), indiferente do tipo de agregado graúdo, o volume de pasta se apresentou estatisticamente significativo sobre o módulo de elasticidade do concreto.

A influência do volume de pasta no módulo de elasticidade do concreto pode ser observada nos gráficos das Figuras 5.24 e 5.25, para os concretos com rochas de diabásio e basalto e, para os concretos com rochas de calcário e granito, respectivamente.

Figura 5. 24 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de diabásio e basalto

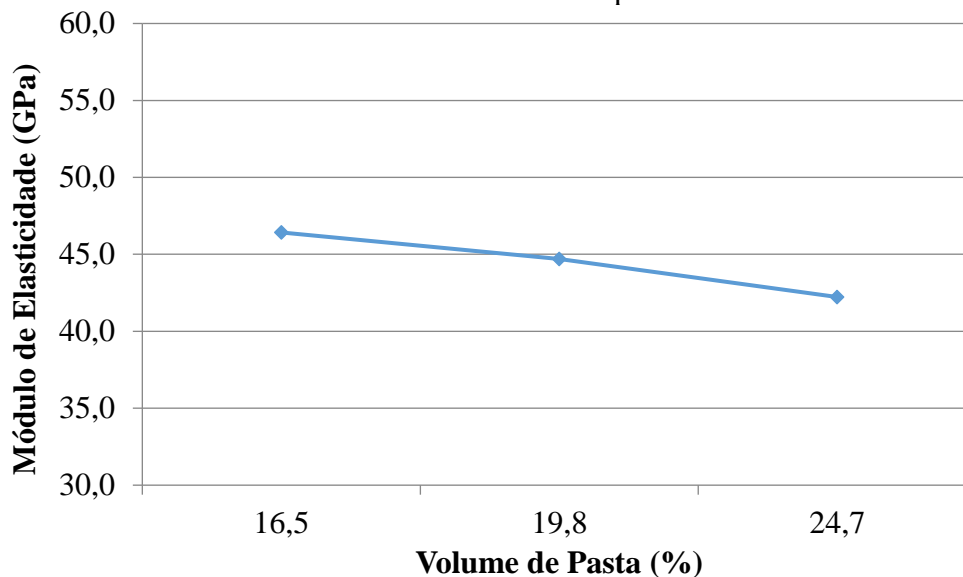
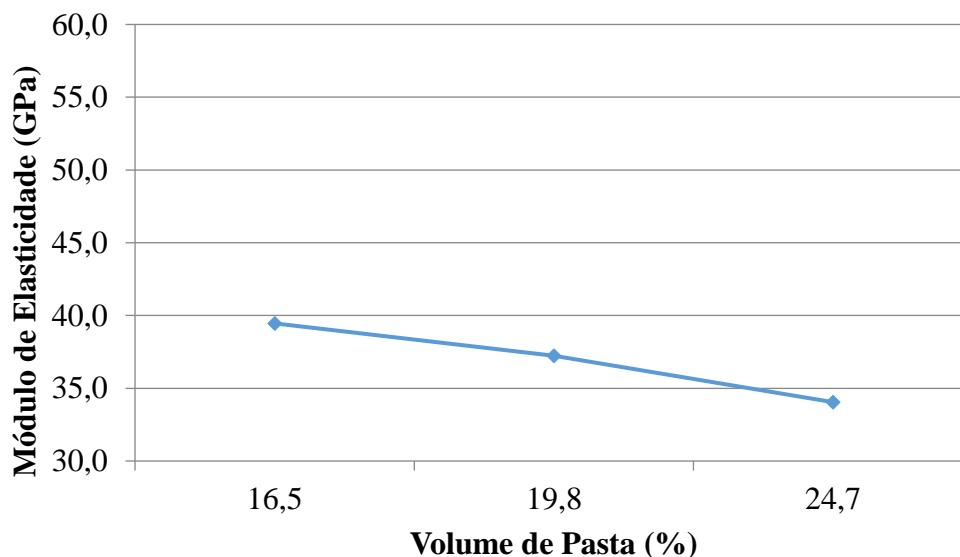


Figura 5. 25 - Efeito isolado da variável volume de pasta: rochas de calcário e granito



Ao observar as Figuras 5.24 e 5.25, percebe-se que o aumento do volume de pasta tende a diminuir o módulo de elasticidade do concreto, o que ocorre com maior intensidade para as rochas de calcário e granito.

Na Figura 5.24, quando se aumentou o volume de pasta de 16,5% para 19,8%, a redução no módulo foi de 3,66%, e quando se elevou ainda mais o volume de pasta, passando de 19,8% para 24,7%, a redução no módulo ficou em torno de 5,59%. Para os concretos produzidos com

rochas de calcário e granito (Figura 5.25), o aumento no volume de pasta de 16,5% para 19,8% ocasionou uma redução no módulo de 5,82%, já quando se elevou ainda mais o volume de pasta de 19,8% para 24,7%, a redução foi cerca de 8,60%. Dessa forma, é possível associar a elevação do valor do módulo de elasticidade ao aumento da quantidade do componente de maior rigidez (agregado graúdo), pois quando se reduziu o volume de pasta, conseqüentemente se aumentou o teor de agregado graúdo na mistura, em que as proporções cimento:agregados foram 1:4,5 (volume de pasta 24,7%), 1:6 (volume de pasta 19,8%) e 1:7,5 (volume de pasta 16,5%).

Girardi (2018) obteve conclusões semelhantes, em que a redução do volume de pasta provocou um crescimento no valor do módulo de deformação, pois, com a redução do volume de pasta de 50,2% para 22,3%, nos traços 1:2 e 1:7, respectivamente, houve alteração no valor do módulo de deformação em 33,5% aos 28 dias. Demais autores também já evidenciaram esse comportamento, com Haecker et. al. (2005), Bauer, Pereira e Leal (2012), Xie *et al.* (2015), Bilesky (2016), entre outros.

5.2.2 Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c)

Assim como o volume de pasta, a relação a/c apresentou influência estatisticamente significativa (Tabelas 5.7 e 5.8) sobre o módulo de elasticidade do concreto. Por meio dos gráficos das Figuras 5.26 e 5.27 é possível observar o efeito isolado da variável para as rochas de diabásio e basalto e para as rochas de calcário e granito, respectivamente.

Figura 5. 26 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de diabásio e basalto

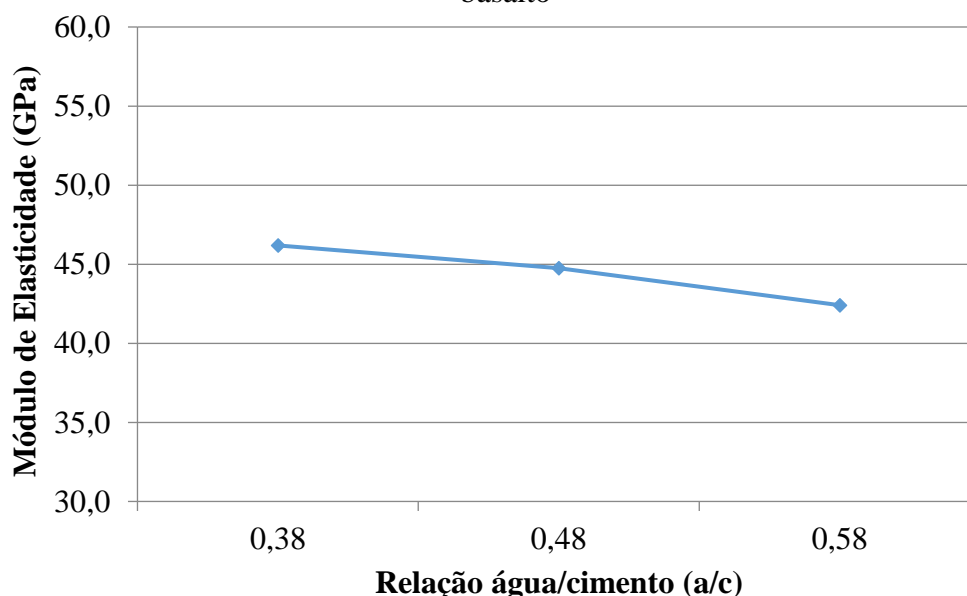
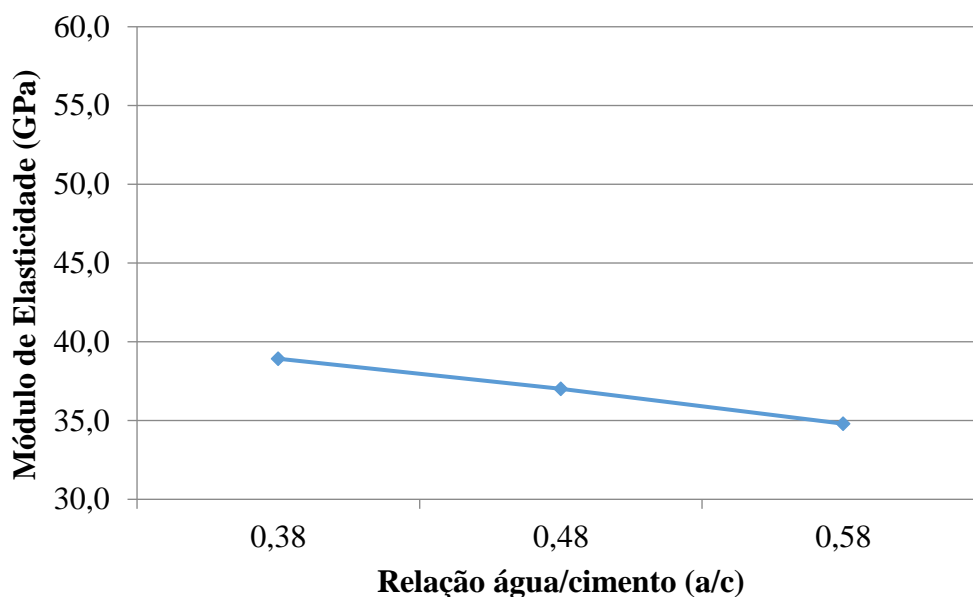


Figura 5. 27 - Efeito isolado da variável relação água/cimento (a/c): rochas de calcário e granito



As Figuras 5.26 e 5.27 permitem afirmar que o módulo de elasticidade do concreto diminuiu com o aumento da relação água/cimento (a/c), pois com relações a/c menores tem-se um menor afastamento dos grãos de aglomerante, menos água livre, menor porosidade da matriz e zona de transição menor, conseqüentemente haverá um espaço menor para o crescimento de cristais de hidróxido de cálcio.

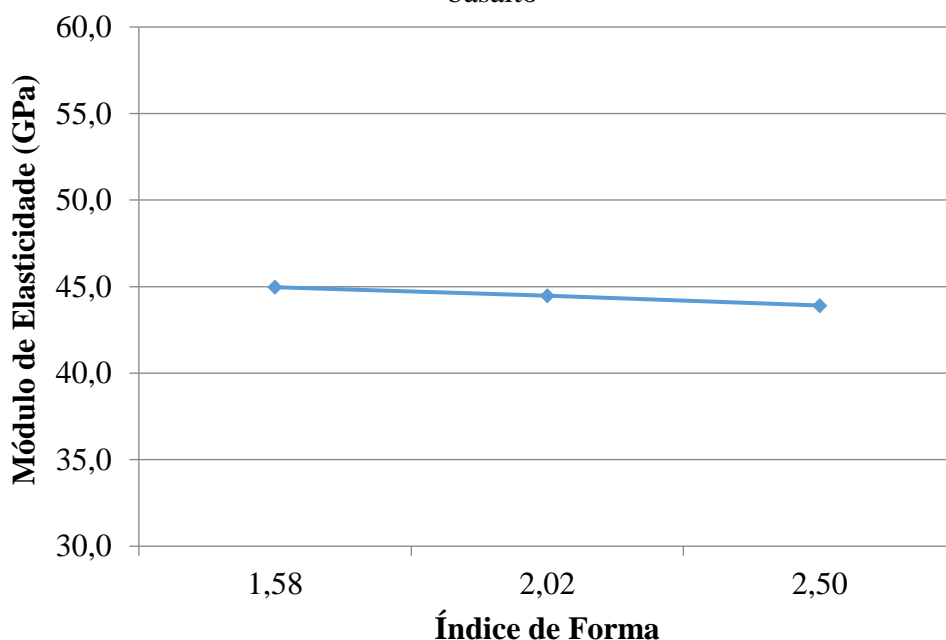
Para os concretos produzidos com rochas de diabásio e basalto (Figura 5.26) a queda no valor do módulo quando se elevou a relação a/c de 0,38 para 0,48 foi de 3,25%, e quando a relação a/c passou de 0,48 para 0,58 a redução foi ainda maior, 5,15%. Comportamento semelhante verifica-se com as rochas de calcário e granito (Figura 5.27), porém com maior intensidade, em que o aumento da relação a/c de 0,38 para 0,48 ocasionou uma queda no módulo de elasticidade de 4,88% e, 5,95% quando aumentou-se a relação a/c de 0,48 para 0,58. O comportamento evidenciado por este estudo também foi confirmado em pesquisas realizadas por Silva (2003), Haecker et. al. (2005), Rohden (2011), Bilesky (2016), entre outros.

Nos estudos de Rohden (2011), com a utilização de diferentes consumos de água, o aumento do consumo de água/m³ de 115 litros para 200 litros ocasionou uma redução no módulo de elasticidade do concreto de 37,5%. Bilesky (2016) estudou a influência da relação a/c no módulo de elasticidade do concreto com três agregados graúdos diferentes, quando aumentou a relação a/c de 0,3 para 0,9, obteve reduções nos valores dos módulos de elasticidade de 45,45%, 45,65% e 47,06%, para os concretos produzidos com agregados de granito, calcário e diabásio, respectivamente.

5.2.3 Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo

Como mencionado anteriormente, a variável forma somente foi analisada com as rochas de diabásio e basalto, devido aos tipos de beneficiamentos adotados pelas pedreiras. A Tabela 5.7 da análise de variância para os concretos produzidos com as rochas de diabásio e basalto indicam a significância estatística da variável forma do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto. Para permitir melhor visualização dessa influência, a Figura 5.28 apresenta o gráfico do efeito isolado.

Figura 5. 28 - Efeito isolado da variável forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto



A Figura 5.28 permite inferir que à medida que o índice de forma do agregado graúdo aumenta, o módulo de elasticidade do concreto diminui. Quando se aumentou o índice de forma de 1,58 para 2,02 a redução do módulo foi de 1,11%, já quando o índice de forma passou de 2,02 para 2,50, a queda no valor do módulo foi cerca de 1,35%. Essas reduções ocasionadas no valor do módulo de elasticidade do concreto podem ser explicadas pelas partículas lamelares que acabam prejudicando o empacotamento e criando vazios, e assim afetando de maneira direta na capacidade de deformação do concreto.

Foram encontrados na literatura poucos estudos referentes a influência da forma do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto, entre eles tem-se pesquisas de Oliveira et al., 2000; Mendes, 2008; Laserna e Montero, 2016; Silva et. al., 2017; HICKEL et. al., 2018.

No entanto, o que se apresenta nesses estudos são conclusões semelhantes às obtidas por esta pesquisa.

5.2.4 Efeito isolado da variável E_c da rocha

O módulo de elasticidade da rocha (E_c) apresentou influência estatística significativa para o módulo de elasticidade do concreto, independente dos tipos de rochas utilizados neste estudo, como pode ser verificado nas Tabelas 5.7 e 5.8, para as rochas de diabásio e basalto e calcário e granito, respectivamente.

As Figuras 5.29 e 5.30 permitem observar o efeito isolado da variável E_c da rocha no módulo de elasticidade do concreto.

Figura 5. 29 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto

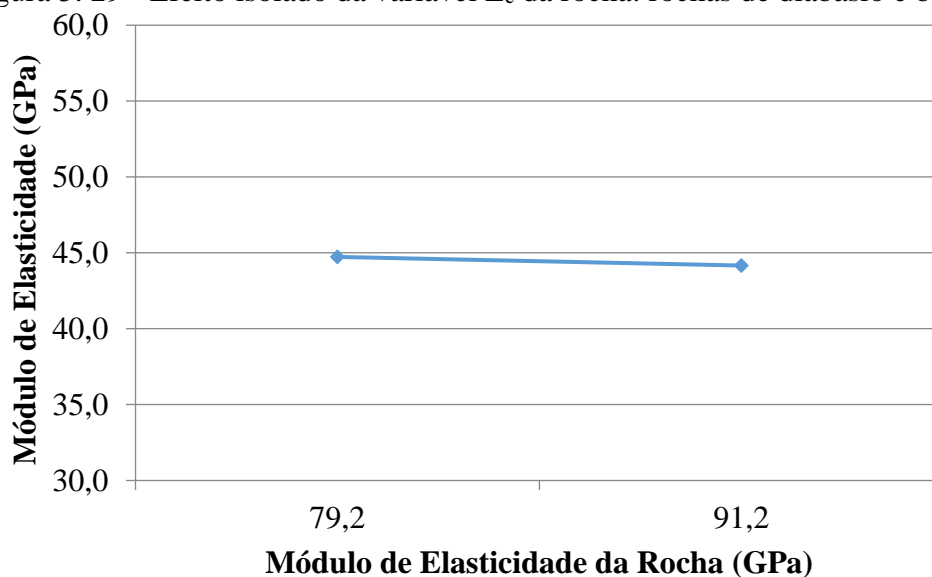
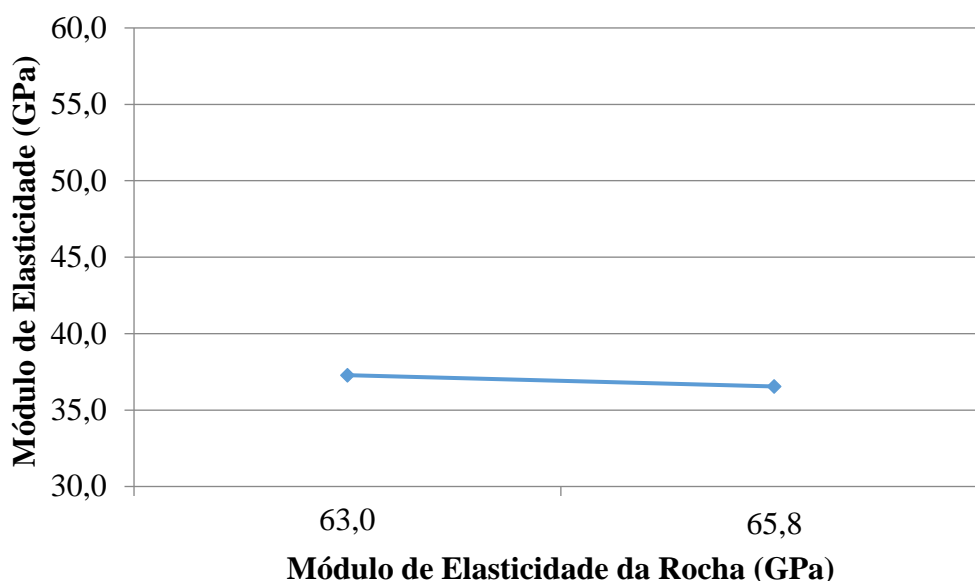


Figura 5. 30 - Efeito isolado da variável E_c da rocha: rochas de calcário e granito

Nas Figuras 5.29 e 5.30 observa-se o efeito isolado da influência do módulo de elasticidade da rocha (E_c) no módulo de elasticidade do concreto. Verifica-se que apesar de estatisticamente a variável se apresentar significativa, as alterações nos resultados para rochas de diabásio (E_c 79,2 GPa e f_c 174,9 MPa) e basalto (E_c 91,2 GPa e f_c 108,3 MPa) são muito pequenas, em que a variação foi de 1,11%. Já quando se observa a Figura 5.30 para concretos com rochas de calcário (E_c 63,0 GPa e f_c 80,2 MPa) e granito (E_c 65,8 GPa e f_c 87,7 MPa), verificam-se alterações nos resultados médios do módulo de elasticidade do concreto com a variação do tipo de rocha de 2,14%.

Pesquisas realizadas por Rashid et al. (2002); Pompeu (2004); Alexander e Mindess (2005); Alhadas (2008); Neto et al. (2011); Ahmad e Alghamdi (2012); Uysal (2012); Gidrão (2015); Beushausen e Dittmer (2015); Bilesky (2016); Santos et al. (2017); Tibbetts et al. (2018) e entre outras, demonstraram que a rigidez do agregado tem um impacto direto no módulo de elasticidade do concreto.

Beushausen e Dittmer (2015) verificaram a influência da rigidez do agregado no módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade. Para tanto fizeram o uso de dois tipos de agregados graúdos, andesito e granito. Os maiores resultados obtidos para o módulo de elasticidade do concreto foram com as misturas de agregados de andesito. Os autores afirmam que a rigidez do andesito e do granito apresentaram a maior influência na diferença das qualidades elásticas dos diferentes concretos, porém não se identificou no trabalho quais são as propriedades mecânicas das rochas utilizadas.

Bilesky (2016) estudou três litologias diferentes de agregados: granito, diabásio e calcário. Os concretos produzidos com agregados de diabásio resultaram em valores de módulo

de elasticidade superiores aos concretos produzidos com agregados de granito e calcário, para todos os níveis de resistência à compressão, atribuindo esse acontecimento ao módulo de elasticidade das rochas, semelhante ao encontrado neste trabalho. No trabalho de Bilesky (2016) também não foram encontrados dados referentes às propriedades mecânicas das rochas. Ainda, as pesquisas de Wu *et al.* (2001), Beshr *et al.* (2003) e Uysal (2012) também confirmam as diferenças significativas entre os valores de módulo de elasticidade do concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos e relação *a/c* constante, em que o módulo de elasticidade do concreto aumentou em decorrência da elevação da resistência e do módulo do agregado.

5.2.5 Interações

As análises estatísticas indicaram que as interações entre as variáveis influenciaram significativamente no módulo de elasticidade do concreto, tanto nas misturas com agregados de diabásio e basalto (Tabela 5.7) como nas misturas com agregados de calcário e granito (Tabela 5.8). Assim como para as interações com as variáveis para a resistência à compressão, para o módulo também se verifica pelo valor de teste F, que o impacto das interações é menor que das variáveis isoladas.

Para permitir a observação do efeito das interações das variáveis no módulo de elasticidade do concreto, nos próximos itens são apresentados os gráficos dos valores médios das interações conforme a significância estatística.

5.2.5.1 Efeito da interação das variáveis volume de pasta e relação água/cimento (*a/c*)

A interação das variáveis volume de pasta e relação *a/c* se mostrou significativa estatisticamente para o módulo de elasticidade do concreto, tanto para as misturas com agregados de diabásio e basalto (Tabela 5.7) como para as misturas com agregados de calcário e granito (Tabela 5.8).

Para permitir a melhor observação desta influência, são apresentados os gráficos das Figuras 5.31 e 5.32, para os concretos com rochas de diabásio e basalto e calcário e granito, respectivamente.

Figura 5. 31 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e a relação a/c: rochas de diabásio e basalto

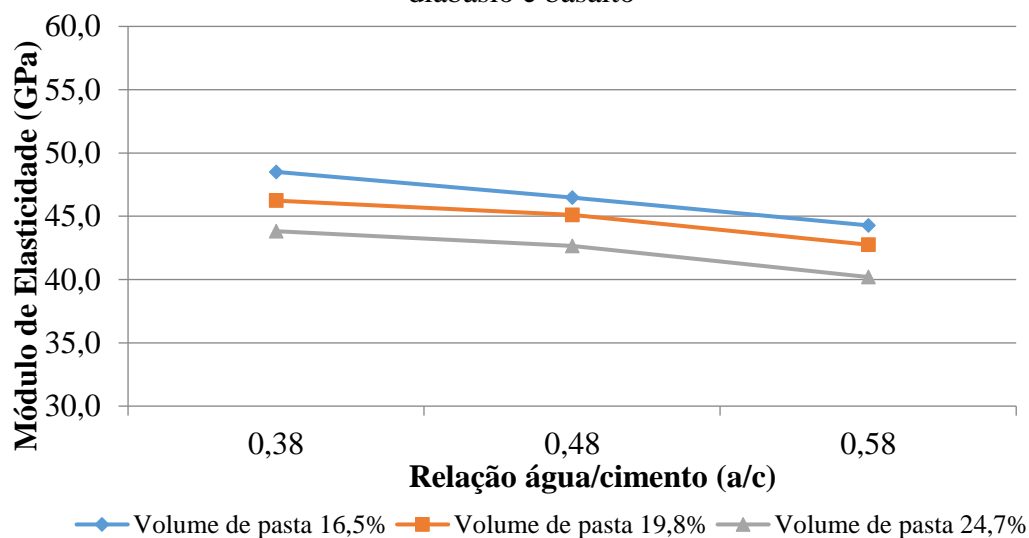
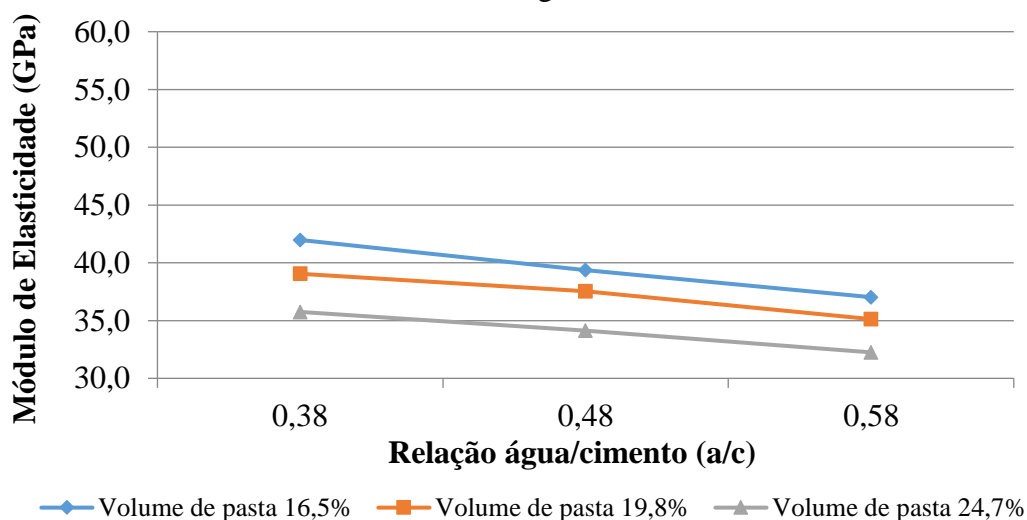


Figura 5. 32 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e a relação a/c: rochas de calcário e granito



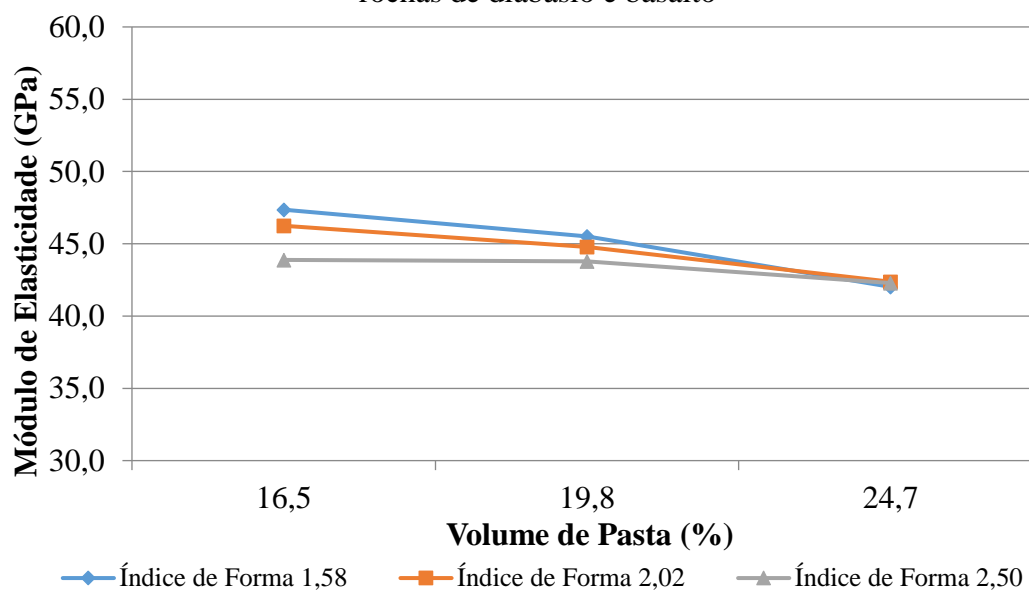
É possível observar nas Figuras 5.31 e 5.32 que o comportamento apresentado é bastante semelhante, ou seja, quanto maior o volume de pasta menor tende a ser o módulo de elasticidade do concreto para todas as relações a/c. Ainda, pode-se inferir que quanto menor a relação a/c maior parece ser a importância do volume de pasta, pois existe maior afastamento entre os valores médios dos diferentes volumes de pasta do que nas relações a/c maiores (0,48 e 0,58).

5.2.5.2 Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo

A análise estatística indica significância para a interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo para os concretos produzidos com diabásio e basalto (Tabela 5.7). Para os agregados de calcário e granito não foi analisada a variável forma do agregado.

É possível observar na Figura 5.33 o efeito da interação.

Figura 5.33 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto



A Figura 5.33 permite inferir que quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior tende a ser o módulo de elasticidade do concreto para todos os volumes de pasta. E ainda, que para volumes de pasta menores o índice de forma do agregado se apresenta com maior importância, ou seja, para o volume de pasta 16,5% os afastamentos entre os valores médios do módulo de elasticidade do concreto são maiores que os afastamentos obtidos com volumes de pasta maiores, 19,8 e 24,7%. Esse comportamento talvez possa ser explicado pelos teores de agregados nas misturas, sendo que quanto menor o volume de pasta, maior é a teor de agregado, fazendo com que a sua forma exerça maior influência sobre o módulo de elasticidade do concreto.

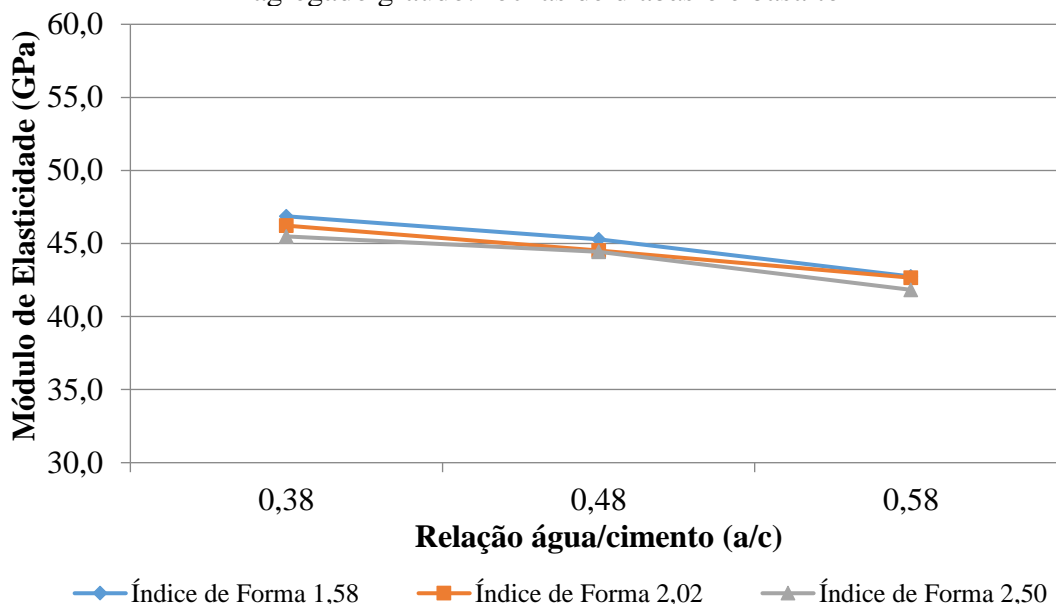
5.2.5.3 Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo

A influência das variáveis relação a/c e forma do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto foi confirmada pela análise de variância apresentada na Tabela 5.7,

com agregados de diabásio e basalto, já que a forma do agregado graúdo não foi estudada para os agregados de calcário e granito.

O gráfico da Figura 5.34 apresenta o efeito da interação entre essas variáveis.

Figura 5.34 - Efeito da interação das variáveis relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto



É possível observar na Figura 5.34 que quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior tende a ser o módulo de elasticidade do concreto para todas as relações a/c. É provável que a significância estatística esteja ocorrendo para essas interações devido ao comportamento dos resultados para o índice de forma 2,02, em que para a relação 0,48 ele se apresenta muito próximo dos valores médios obtidos para o índice de forma 2,50, mas quando aumenta-se a relação a/c para 0,58, ele assume valores próximos dos resultados para o índice de forma 1,58. Como já explicado em itens anteriores, esse acontecimento pode ser devido à composição do índice de forma 2,02 em laboratório.

Vale frisar que apesar da interação dessas variáveis se mostrar estatisticamente significativa para o módulo de elasticidade do concreto, no aspecto prático o efeito é muito pequeno, não apresentando grande importância.

5.2.5.4 Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha

A interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha apresentou significância estatística tanto para os concretos produzidos com agregados de diabásio e basalto (Tabela 5.7) quanto para os concretos produzidos com agregados de calcário e granito (Tabela 5.8).

O efeito da interação dessas variáveis pode ser observado nas Figuras 5.35 e 5.36, diabásio e basalto, e calcário e granito, respectivamente.

Figura 5. 35 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto

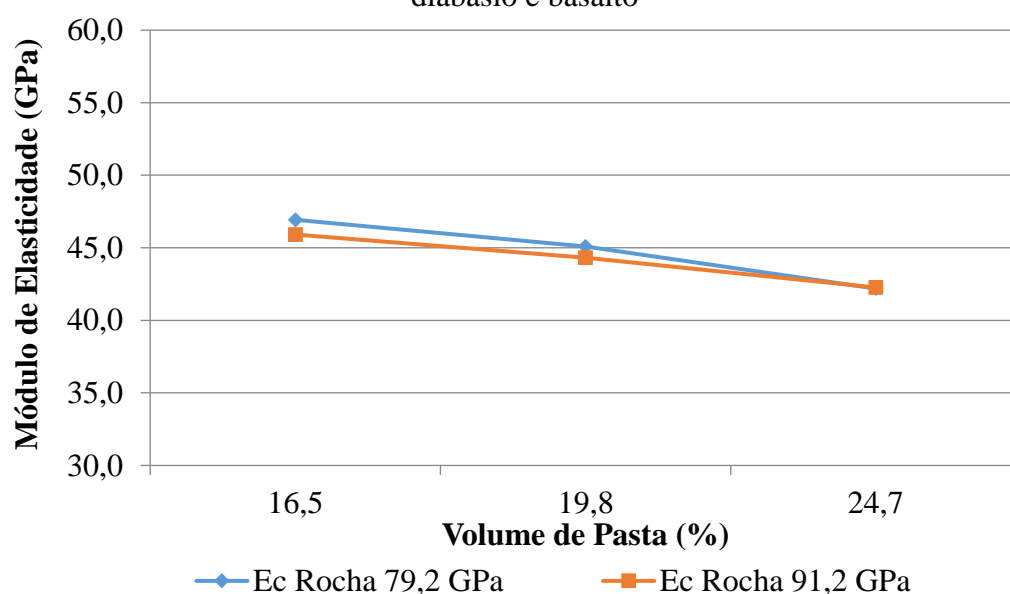
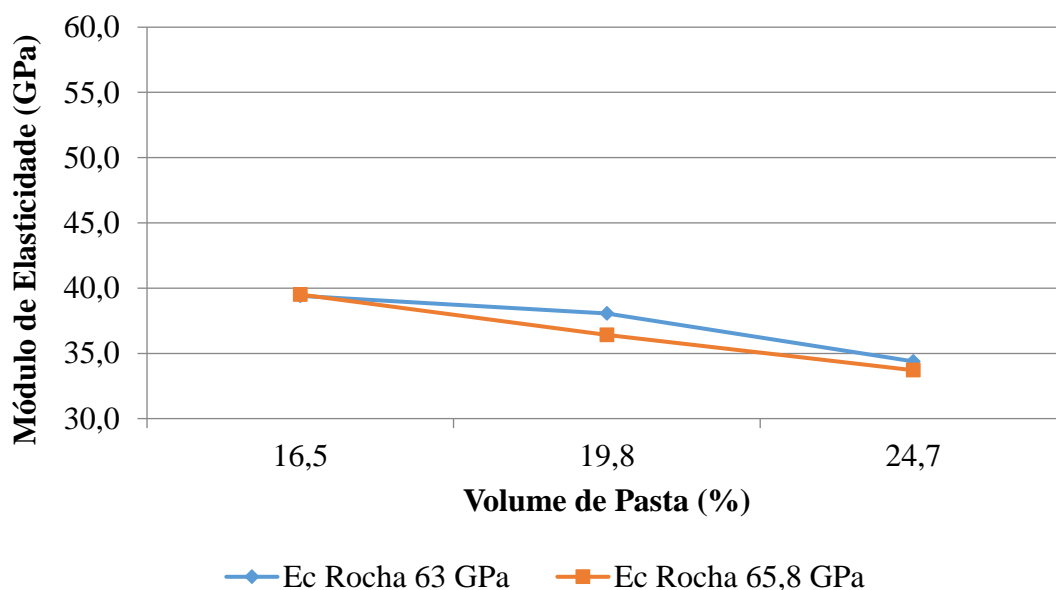


Figura 5. 36 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta e E_c da rocha: rochas de calcário e granito



Ao observar as Figuras 5.35 e 5.36, pode-se inferir que os comportamentos apresentados pelas rochas de diabásio (E_c 79,2 GPa) e basalto (E_c 91,2 GPa) quando relacionados com o volume de pasta diferem dos comportamentos apresentados pelas rochas de calcário (E_c 63 GPa) e granito (E_c 65,8 GPa).

A Figura 5.35 está mostrando que quanto maior o volume de pasta menos tem importância o tipo de rocha utilizada na produção do concreto. O que apresenta coerência, pois as misturas de concreto com volume de pasta maior, conseqüentemente terão um teor reduzido de agregado graúdo e quanto mais pasta, maior é a espessura da pasta entre os agregados, passando esta a ter uma influência maior no módulo. Já na Figura 5.36, com rochas de calcário e granito, o efeito da interação parece confuso, pois verifica-se para o menor volume de pasta (16,5%) e o maior (24,7%) valores muito próximos para os diferentes tipos de rochas, sendo que o afastamento entre os resultados médio acontece para o volume de pasta 19,8%. Este comportamento dificulta a interpretação do efeito da interação no módulo de elasticidade do concreto.

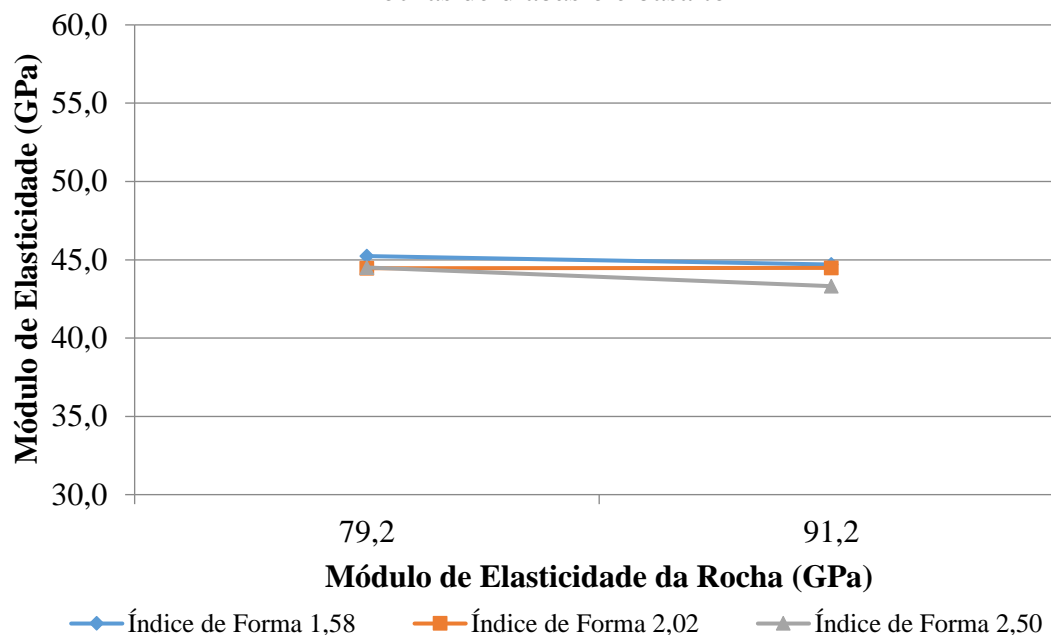
Como para ambas as análises os efeitos apresentados pela interação são muito menores que das variáveis principais e algumas interações, comprovado pelo teste F das Tabelas 5.7 e 5.8, esta interação e o efeito inconclusivo da Figura 5.36 não levam a grandes prejuízos para o âmbito prático, já que as variações no módulo de elasticidade do concreto são consideradas muito pequenas quando da referida interação das variáveis.

5.2.5.5 Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c a rocha

Por meio da Tabela 5.7 evidenciou-se a influência estatisticamente significativa da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha no módulo de elasticidade do concreto com agregados de diabásio e basalto.

Na Figura 5.37 pode ser observado o efeito da interação dessas variáveis no módulo de elasticidade do concreto.

Figura 5. 37 - Efeito da interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto



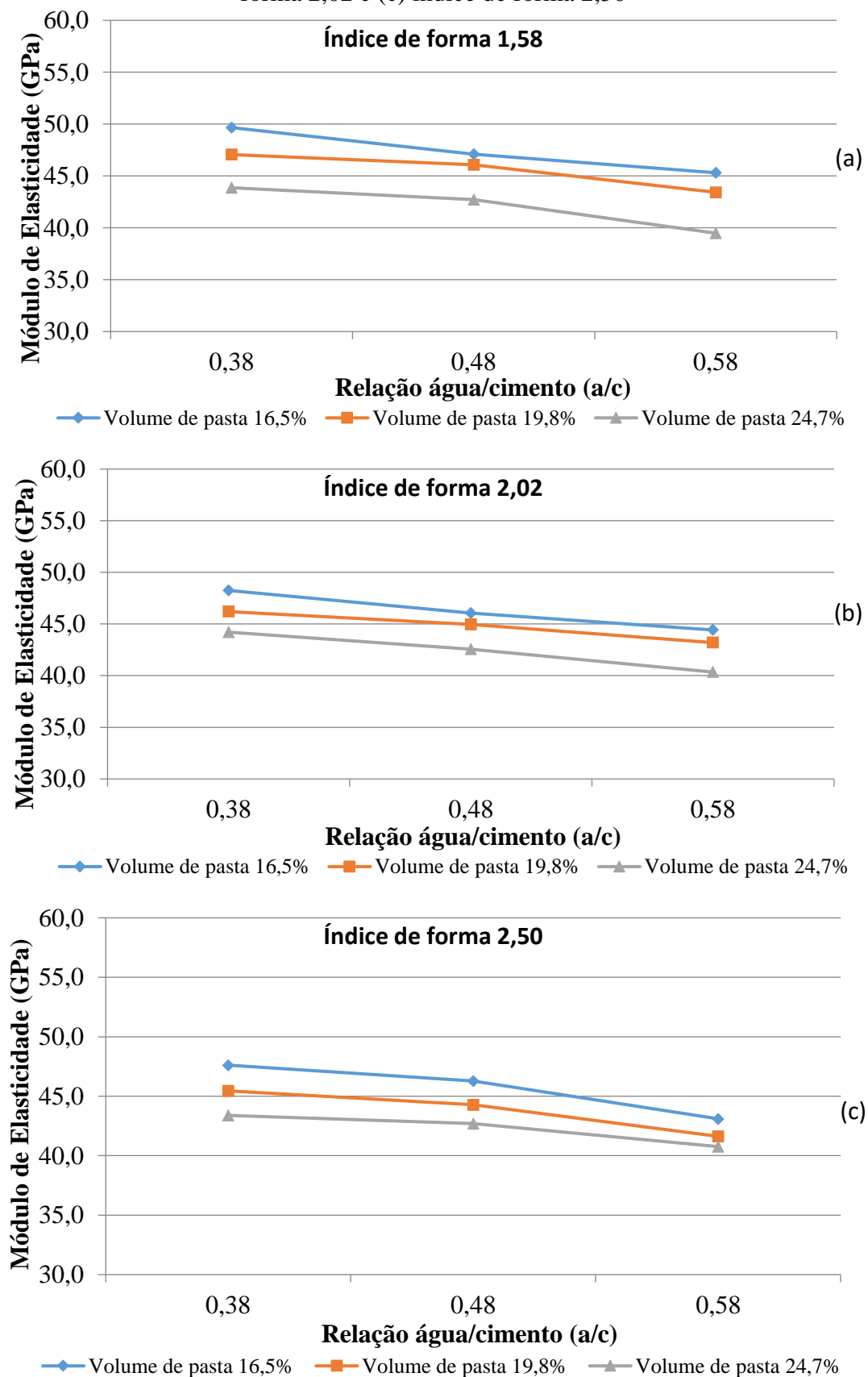
Como evidenciado por diversos estudos e também por esta pesquisa, as características do agregado graúdo exercem influência sobre as propriedades do concreto, no entanto, quando se analisa a Figura 5.37 que apresenta a interação das variáveis forma do agregado graúdo e E_c da rocha verifica-se que, para as rochas em estudo, o índice de forma do agregado graúdo se mostrou com maior importância para a rocha de basalto (E_c 91,2 GPa). Para ambas as rochas os maiores valores de módulo de elasticidade do concreto foram obtidos com o menor índice (1,58), no entanto as variações foram muito pequenas. Mesmo a análise estatística estar indicando a influência dessa interação para o módulo de elasticidade do concreto, a mesma não apresenta grande importância para a área prática.

5.2.5.6 Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo

A interação de terceira ordem das variáveis volume de pasta, relação a/c e forma do agregado graúdo se mostrou estatisticamente significativa para o módulo de elasticidade do concreto com as rochas de diabásio e basalto (Tabela 5.7).

O efeito da interação das variáveis pode ser observado na Figura 5.38, em que se plotou um gráfico para cada forma do agregado graúdo.

Figura 5. 38 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e forma do agregado graúdo: rochas de diabásio e basalto (a) índice de forma 1,58; (b) índice de forma 2,02 e (c) índice de forma 2,50



Os gráficos da Figura 5.38 permitem inferir que para todos os índices de formas do agregado graúdo (1,58, 2,02 e 2,50) e todas as relações água/cimento (0,38, 0,48 e 0,58), quanto menor o volume de pasta maiores foram os valores médios de módulo de elasticidade do concreto.

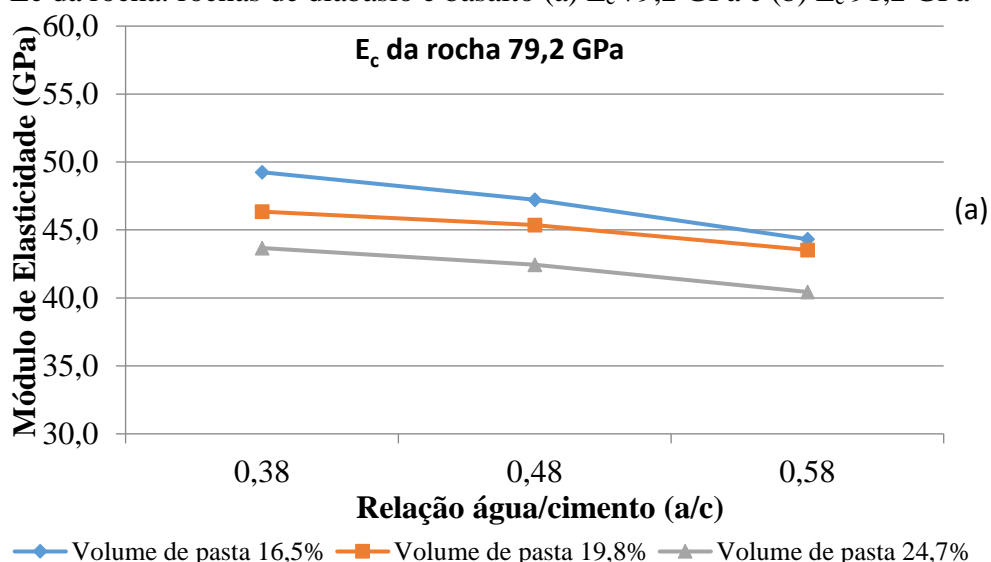
Vale frisar que apesar da interação dessas variáveis se mostrar estatisticamente significativa, as influências sobre o módulo de elasticidade são muito pequenas e, no âmbito prático, não apresentam grande importância.

5.2.5.7 Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha

A influência da interação das variáveis volume de pasta, relação a/c e E_c da rocha no módulo de elasticidade do concreto foi confirmada estatisticamente para as análises com rochas de diabásio e basalto (Tabela 5.7) e calcário e granito (Tabela 5.8).

Para evidenciar melhor este efeito, são apresentados os gráficos das Figuras 5.39 e 5.40, em que para permitir tal observação foram plotados em separado para o tipo de rocha.

Figura 5. 39 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto (a) E_c 79,2 GPa e (b) E_c 91,2 GPa



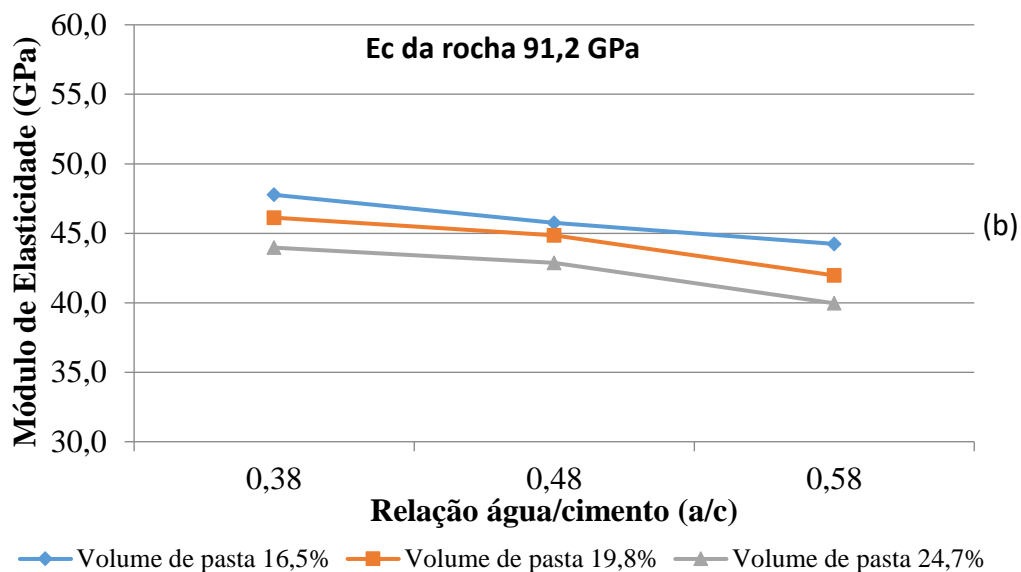
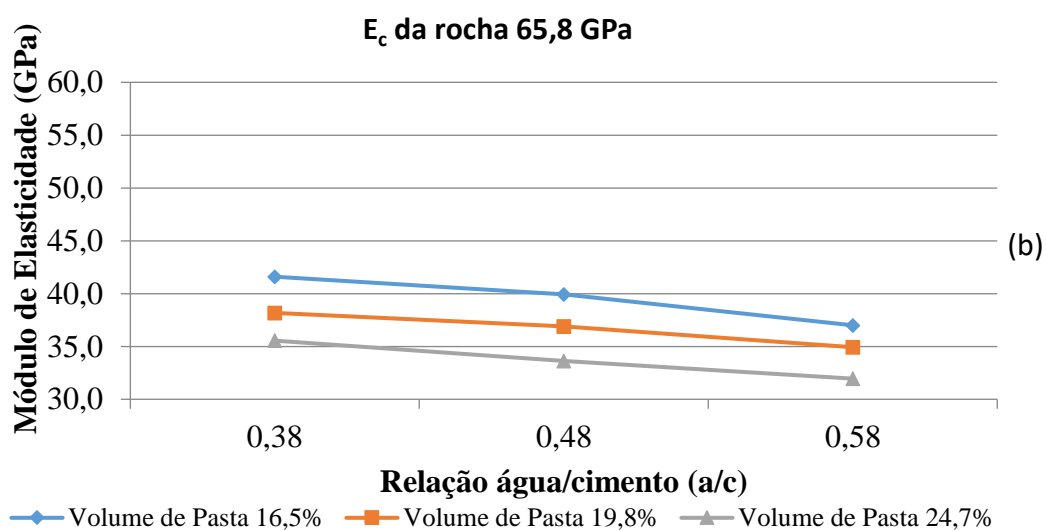
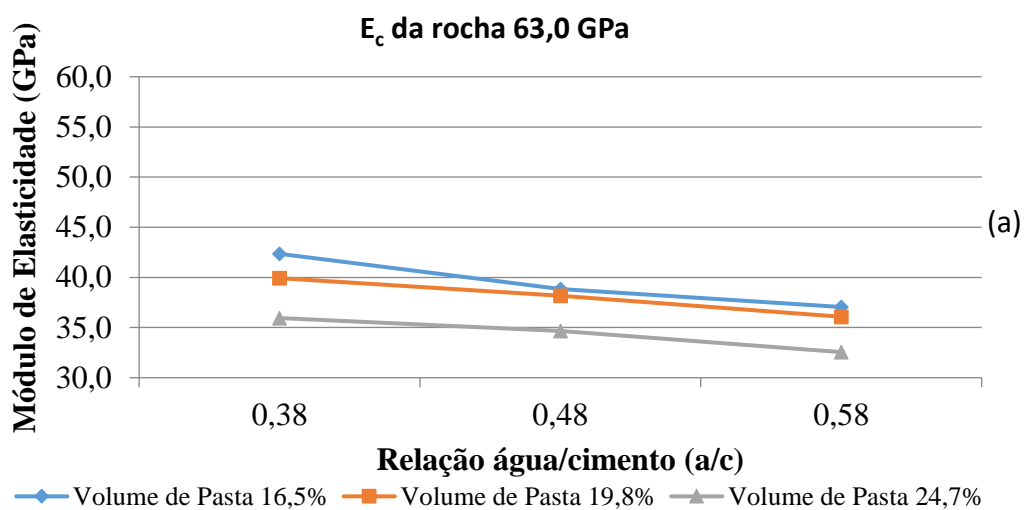


Figura 5. 40 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, relação água/cimento (a/c) e E_c da rocha: rochas de calcário e granito (a) E_c 63,0 GPa e (b) E_c 65,8 GPa



Os gráficos das Figuras 5.39 e 5.40 permitem afirmar que para todos os tipos de rochas e todas as relações a/c (0,38, 0,48 e 0,58), quanto menor o volume de pasta maior o valor do módulo de elasticidade do concreto.

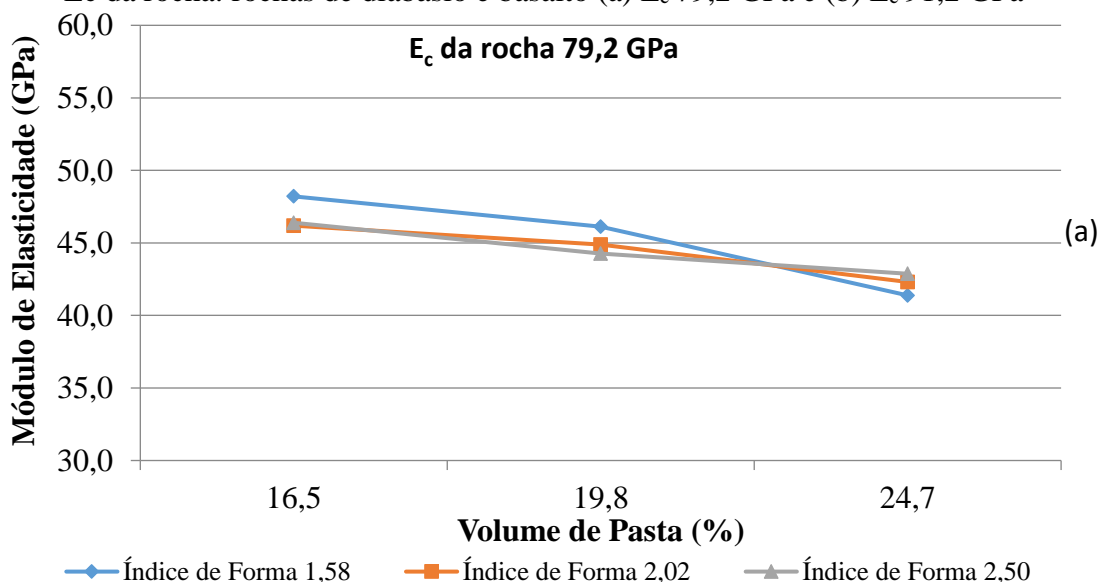
Conforme as análises de variância (ANOVA) das Tabelas 5.7 e 5.8, a significância estatística da interação das variáveis volume de pasta, relação a/c e E_c da rocha se mostrou significativa, porém com menos impacto sobre o módulo de elasticidade do concreto que as variáveis principais e algumas das demais interações, o que pode ser comprovado nas Tabelas da ANOVA pelo valor do teste F.

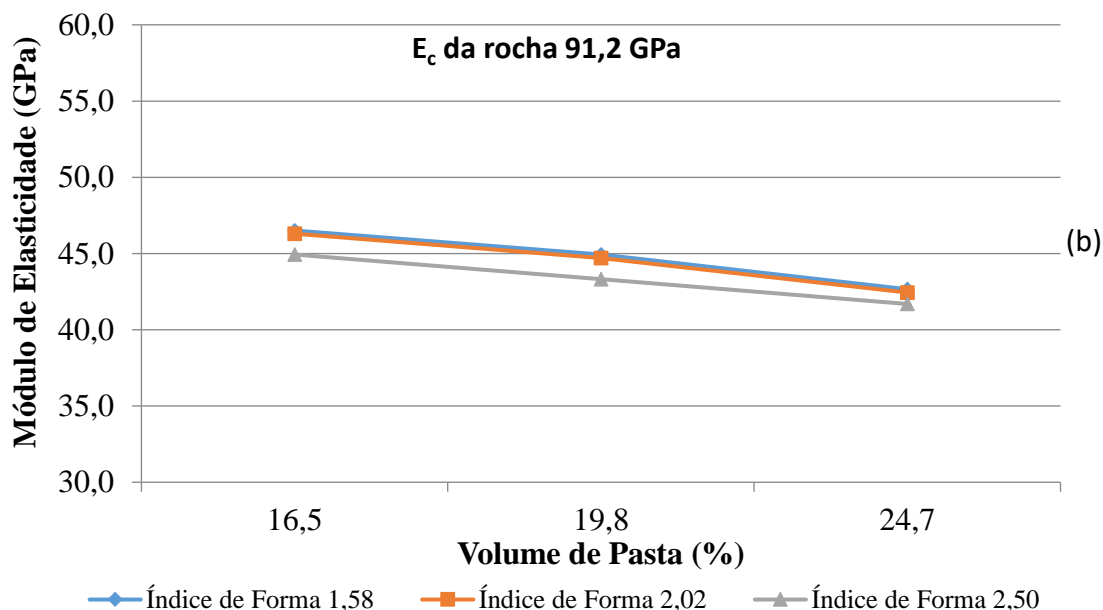
5.2.5.8 Efeito da interação das variáveis volume de pasta, forma do agregado graúdo e E_c da rocha

Para os concretos produzidos com agregados de diabásio e basalto a interação das variáveis volume de pasta, forma do agregado graúdo e E_c da rocha se mostrou estatisticamente significativa por meio da análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 5.7.

A observação do efeito da interação pode ser realizada por meio da Figura 5.41, em que é apresentado um gráfico para cada rocha.

Figura 5. 41 - Efeito da interação das variáveis volume de pasta, forma do agregado graúdo e E_c da rocha: rochas de diabásio e basalto (a) E_c 79,2 GPa e (b) E_c 91,2 GPa





Pelos gráficos da Figura 5.41 se pode inferir que para o volume de pasta maior (24,7%) a forma do agregado graúdo apresenta pouca importância para o módulo de elasticidade do concreto, tanto para a rocha de diabásio (E_c 79,2 GPa) quanto para a rocha de basalto (E_c 91,2 GPa).

O índice de forma intermediário (2,02) apresenta comportamento diferente para as rochas, ou seja, para a rocha de diabásio ele assumiu o comportamento do maior índice de forma (2,50), já para a rocha de basalto, ele assume comportamento semelhante ao menor índice de forma (1,58).

Assim como na interação do item anterior, a interação em questão também não apresenta tanta influência sobre o módulo de elasticidade do concreto, apesar da análise estatística estar indicando a significância, o teste F comprova este fato, pois é bem menor que para as variáveis principais e até mesmo outras interações (Tabela 5.7).

5.3 MODELO PARA A PREVISÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Considerando que as duas técnicas de seleção de modelo de previsão, “técnica de todos os modelos possíveis” e “técnica de seleção automática”, indicaram que o melhor modelo seria com todas as variáveis, ou seja, volume de pasta (VP), resistência à compressão (f_{cj}), forma do agregado graúdo (F) e módulo de elasticidade da rocha (MER), considerou-se essas abreviações para que a equação ficasse melhor representada (Equação 5.1).

$$E_{ci} = 27,5234 - 0,6148 \cdot VP + 0,2103 \cdot f_{cj} + 0,1435 \cdot F + 0,2256 \cdot MER$$

Equação 5.1

Na Tabela 5.9 tem-se a ANOVA da regressão, que indica a influência significativa de todas as variáveis do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto.

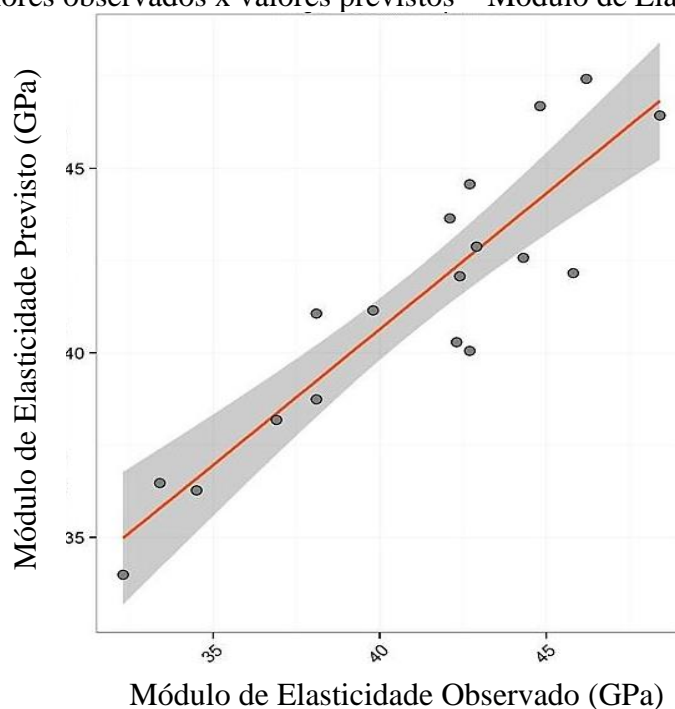
Tabela 5.9 - ANOVA da regressão – Módulo de Elasticidade do concreto

Parâmetros	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor "p"	Significância
Volume de Pasta	1	437,162	437,162	106,433	2,25E-19	S
Resistência à Compressão (f_{cj})	1	675,373	675,373	164,429	3,3E-26	S
Forma do agregado graúdo	1	65,739	65,739	16,005	9,71E-05	S
Módulo de Elasticidade da Rocha	1	739,366	739,366	180,009	7,86E-28	S
Resíduos	157	644,857	4,107			

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

No gráfico da Figura 5.42 é ilustrada a relação entre os valores observados (reais) e os valores estimados (previstos) para o módulo de elasticidade do concreto, quando da interação entre as variáveis em estudo (volume de pasta, resistência à compressão (f_{cj}), forma do agregado graúdo e módulo de elasticidade da rocha), ou seja, aplicando o modelo proposto para previsão do módulo de elasticidade do concreto (Equação 5.1), em que se observa que alguns resultados encontram-se próximos da diagonal e outros apresentam um pequeno afastamento.

Figura 5. 42 - Valores observados x valores previstos – Módulo de Elasticidade do Concreto



Fonte: Autoria própria.

Conforme mencionado anteriormente, após os procedimentos de seleção das variáveis e da análise de regressão linear múltipla para a formulação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto, realizou-se a validação do mesmo por meio dos cálculos das Equações 4.1 a 4.8. A validação está apresentada na Tabela 5.10.

Tabela 5. 10 - Validação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto

EPE	EM	REQM	EMA	R²	d	c	r
2,03	0,39	1,98	1,76	0,82	0,90	0,81	0,90

Onde: erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de determinação (R²), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) do modelo de estimativa do módulo de elasticidade do concreto.

Conforme a Tabela 5.10 o modelo para a previsão do módulo de elasticidade do concreto apresentou resultados satisfatórios, com um coeficiente de determinação de 0,82, ou seja, 82% dos resultados podem ser explicados pelo modelo proposto. Apresentando também uma concordância favorável (d=0,90) e um desempenho considerado muito bom (c=0,81). Dessa forma, os resultados indicam a viabilidade de aplicação deste modelo para a previsão do módulo de elasticidade de concretos convencionais.

5.3.1 Comparação entre o modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto com demais normas e modelos conhecidos na literatura

Objetivando comparar o modelo proposto para a previsão do módulo de elasticidade do concreto com os demais modelos propostos por normas e modelos conhecidos na literatura, selecionou-se as normas NBR 6118 (ABNT,2014), ACI 3018 (2014), Fib Modelo Code (2010) e EUROCODE 2 (2004) e os modelos conhecidos na literatura propostos por Dal Molin e Monteiro (1996), Barbosa (2009), Bilesky (2016) e Kummer (2016). Após a escolha dos modelos para a comparação com o modelo proposto, realizou-se a validação de todos os modelos pelos mesmos métodos realizados quando se fez a validação do modelo proposto, ou seja, com a utilização das Equações 4.1 a 4.8. Os resultados das validações estão apresentados na Tabela 5.11. Vale frisar que para a validação dos demais modelos foram utilizados os mesmos dados que para a validação do modelo formulado por este trabalho, ou seja, utilizando 25% de todos os dados. Dessa forma, os resultados utilizados para a formulação do modelo proposto não são os mesmos que os resultados utilizados para a validação, como mencionado anteriormente.

Tabela 5. 11 - Comparação da validação do modelo proposto para a previsão do módulo de elasticidade do concreto com os demais modelos conhecidos

Autores	EPE	EM	REQM	EMA	R²	d	c	r
Proposto por este trabalho (Equação 5.1)	2,03	0,39	1,98	1,76	0,82	0,90	0,81	0,90
NBR 6118 (ABNT,2014)	6,41	3,59	6,23	4,99	0,34	0,58	0,34	0,59
ACI 3018 (2014)	11,37	9,92	11,05	9,92	0,08	0,42	0,12	0,28
Fib Modelo Code (2010)	4,58	2,79	4,46	3,61	0,59	0,70	0,53	0,77
EUROCODE 2 (2004)	4,03	1,50	3,92	3,09	0,59	0,73	0,56	0,77
Dal Molin e Monteiro (1996)	13,08	11,94	12,71	11,94	0,08	0,39	0,11	0,28
Barbosa (2009)	6,26	3,01	6,08	4,97	0,08	0,61	0,17	0,28
Bilesky (2016)	14,10	12,83	13,71	12,83	0,07	0,37	0,10	0,27
Kummer (2016)	9,61	8,29	9,34	8,29	0,07	0,46	0,13	0,27

Onde: erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de determinação (R²), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) do modelo de estimativa do módulo de elasticidade do concreto.

Ao comparar os erros do modelo proposto com os demais percebe-se pela Tabela 5.11 que o mesmo apresentou o menor erro de estimativa ($EPE=2,03$), seguido pelos modelos propostos pela Eurocode 2 (2004) que apresentou $EPE=4,03$ e o modelo da Fib (2010) com $EPE=4,58$, superiores em 49,63% e 55,68%, respectivamente. Já os modelos que apresentaram maiores erros de estimativa foram: Barbosa (2009), NBR 6118 (ABNT,2014), Kummer (2016), ACI 3018 (2014), Dal Molin e Monteiro (1996), Bilesky (2016), correspondendo a 208,37%, 215,76%, 373,40%, 460,10%, 544,33%, 594,58%, respectivamente, maiores que o modelo proposto por esta pesquisa.

Quanto ao erro médio percebe-se que o modelo proposto por esta pesquisa apresenta o menor erro médio ($EM=0,39$), seguido pelos modelos: Eurocode 2 (2004) ($EM=1,50$), Fib Modelo Code (2010) ($EM=2,79$), Barbosa (2009) ($EM=3,01$), NBR 6118 (ABNT,2014) ($EM=3,59$), Kummer (2016) ($EM=8,29$), ACI 3018 (2014) ($EM=9,92$), Dal Molin e Monteiro (1996) ($EM=11,94$), e Bilesky (2016) ($EM=12,83$), em ordem de crescimento de erro médio. Em relação à raiz do erro quadrático médio e o erro médio absoluto, tem-se semelhança com a ordem de crescimento dos erros apresentada pela análise do erro de estimativa.

O coeficiente de determinação para o modelo proposto é de 0,82, ou seja, 82% dos resultados para o módulo de elasticidade do concreto podem ser explicados pelo modelo proposto. Os modelos com coeficientes de determinação mais próximos foram Fib Modelo Code (2010) e Eurocode 2 (2004), com 0,59 para ambos, correspondendo a aproximadamente 28,05% menores que o coeficiente de determinação do modelo proposto pela presente pesquisa. Os demais modelos apresentaram coeficientes de determinação menores que os citados, ficando na ordem de 58,54%, 90,24%, 90,24%, 90,24%, 91,46% e 91,46% para os respectivos modelos: NBR 6118 (ABNT,2014), Dal Molin e Monteiro (1996), ACI 3018 (2014) e Barbosa (2009), Bilesky (2016) e Kummer (2016). Dessa forma, conclui-se que os modelos que melhor explicam os resultados são: o modelo proposto pela presente pesquisa e os modelos de Fib Modelo Code (2010) e Eurocode 2 (2004).

A melhor concordância foi obtida pelo modelo proposto por este trabalho ($d=0,90$), seguido pela concordância do modelo Eurocode 2 (2004) ($d=0,73$) e Fib Modelo Code (2010) ($d=0,70$), sendo que todos os demais modelos apresentaram concordâncias inferiores. Em relação ao desempenho dos modelos, o que apresentou desempenho superior aos demais foi o proposto por esta pesquisa ($c=0,81$), considerado muito bom, em seguida foram os modelos Eurocode 2 (2004) e Fib Modelo Code (2010), com desempenhos ($c=0,56$ e $0,53$), ou seja, ambos apresentaram desempenhos considerados sofríveis. Os demais modelos apresentaram desempenhos inferiores aos modelos citados, que ficaram na ordem de NBR 6118 (ABNT,

2014) ($c=0,34$), Barbosa (2009) ($c=0,17$), Kummer (2016) ($c=0,13$), ACI 3018 (2014) ($c=0,12$), Dal Molin e Monteiro (1996) ($c=0,11$) e Bilesky (2016) ($c=0,10$), considerados desempenhos péssimos.

A correlação linear dos dados observados e estimados pelo modelo proposto foi igual a $r=0,90$. Os modelos Fib Modelo Code (2010) e Eurocode 2 (2004) apresentaram correlações iguais a $r=0,77$. Todos os demais modelos apresentaram correlações inferiores aos citados, que ficaram na ordem de $r=0,59$ para o modelo da NBR 6118 (ABNT, 2014) e para os demais $r=0,28$ e $r=0,27$. Portanto, todos os modelos indicam que há associação entre os valores observados e os estimados pelos modelos, mas que as melhores associações são dadas pelo modelo proposto pela presente pesquisa e os modelos da Fib Modelo Code (2010) e Eurocode 2 (2004), pois seus resultados foram mais próximos de 1, sendo que o valor 1 indica que as variáveis estão diretamente relacionadas.

Portando, considerando os resultados da Tabela 5.11 pode-se afirmar que os modelos que melhor explicam os resultados observados é o modelo proposto pela presente pesquisa, o modelo Fib Modelo Code (2010) e o modelo Eurocode 2 (2004), pois foram os modelos que apresentaram os menores erros e os maiores coeficientes estatísticos.

Conhecendo os modelos que se apresentam com resultados mais satisfatórios para a previsão do módulo de elasticidade do concreto, analisaram-se quais são as variáveis que compõem esses modelos, conforme a Tabela 5.12.

Tabela 5. 12 - Variáveis dos melhores modelos considerados para a previsão do módulo de elasticidade do concreto

Modelos	Variáveis consideradas nos modelos
Proposto por este trabalho (Equação 5.1)	Volume de pasta, f_{cj} , forma e módulo de elasticidade da rocha
Fib Modelo Code (2010)	f_{ck} e tipo de agregado
EUROCODE 2 (2004)	f_{ck} e tipo de agregado

Conforme a Tabela 5.12 percebe-se que entre os melhores modelos para a previsão do módulo de elasticidade considerados por meio da validação, o único que considera como dados de entrada o volume de pasta, f_{cj} , forma do agregado graúdo e módulo de elasticidade da rocha é o modelo proposto por esta pesquisa. Os demais consideram apenas o f_{ck} do concreto e o tipo de agregado, semelhante com a equação proposta pela norma nacional NBR 6118 (NBR, 2014), porém a mesma não se apresentou entre os melhores modelos, pois resultou em erros superiores

aos modelos listadas na Tabela 5.12, e coeficientes estatísticos menores, conforme apresentado na Tabela 5.11.

Dessa forma, o modelo proposto pela norma brasileira não representa os resultados experimentais de maneira adequada, fato este evidenciado por este trabalho e também por diversos autores, entre eles Alhadas (2008), Cabral (2014), Arruda (2013) e Girardi (2018), entre outros.

Portanto, observa-se pelos fatos estudados que o modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) necessita ser ajustado, para que permita que o módulo de elasticidade do concreto estimado represente o mais próximo possível o módulo de elasticidade do concreto apresentado nas obras de construção civil.

5.3.1.1 Validação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto com outros dados da bibliografia

Na bibliografia não foram encontrados trabalhos que fornecessem todos os dados de entrada do modelo proposto por esta pesquisa, para que fosse possível fazer uma validação mais abrangente. No entanto, o trabalho de Girardi (2018) fornece a maioria das informações necessárias para substituir no modelo, exceto o índice de forma dos agregados graúdos. Sendo assim, considerou-se valores usuais de índices de forma de agregados graúdos da região de Porto Alegre/RS, ou seja, 1,50 para basalto e diabásio, e 1,80 para granito. Os demais dados estão no Apêndice B.

Na Tabela 5.13 é apresentada a validação do modelo proposto com os dados de Girardi (2018).

Tabela 5. 13 - Validação do modelo proposto por esta pesquisa com outros dados

Autor	EPE	EM	REQM	EMA	R²	d	c	r
Girardi (2018)	4,33	1,71	4,21	2,09	0,62	0,57	0,37	0,65

Onde: erro padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), raiz do erro quadrático médio (REQM), erro médio absoluto (EMA), coeficiente de determinação (R²), coeficiente de concordância (d), coeficiente de correlação (r) e índice de confiança (c) do modelo de estimativa do módulo de elasticidade do concreto.

A Tabela 5.13 permite afirmar que utilizando os dados de outro autor, o modelo previsto por este trabalho se mostra adequado para representar os valores experimentais. Pois, ao comparar a Tabela 5.13 (validação com dados de outro autor) com a Tabela 5.11 (validação com dados dessa pesquisa) percebe-se que os valores se aproximam dos melhores modelos entre os validados, com menores erros e melhores coeficientes estatísticos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desta pesquisa foi propor um modelo de previsão para o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland. Para que se atingisse este objetivo foram estudadas diversas misturas de concreto, tendo como variáveis independentes o volume de pasta, a relação a/c, a forma e o módulo de elasticidade do agregado graúdo. Essas variáveis foram selecionadas devido à influência que as mesmas exercem sobre o módulo de elasticidade do concreto, fato este verificado na bibliografia existente. Porém, a maioria dos estudos já realizados não levaram em consideração a influência conjunta de todas essas variáveis, resultando em modelos de previsão do módulo de elasticidade do concreto não representativos dos valores experimentais, comprometendo a aplicabilidade dos mesmos com maior confiabilidade, entre estes modelos tem-se o modelo indicado pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

6.1 CONCLUSÕES

As conclusões deste trabalho são referentes às influências das diferentes variáveis estudadas sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto de cimento Portland, analisadas para cada uma das rochas selecionadas. Também se conclui quanto ao modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto quando se analisam todas as variáveis e todas as rochas juntas. As referidas conclusões foram:

- a) quanto menor o volume de pasta menor tende a ser a resistência à compressão e maior o módulo de elasticidade do concreto, para todas as rochas estudadas;
- b) o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto diminuem com o aumento da relação água/cimento;
- c) a forma do agregado graúdo apresenta influência sobre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto, quanto menor o índice de forma do agregado graúdo maior tende a ser a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto;
- d) o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do concreto são influenciados pelas propriedades mecânicas do agregado graúdo;
- e) quando se avaliou a resistência à compressão para os concretos com agregados graúdos de rochas de diabásio e basalto, a variável de maior significância estatística foi a relação água/cimento (a/c), seguida pelo volume de pasta, forma do agregado graúdo e E_c da rocha. Já para a propriedade módulo de elasticidade do concreto com as mesmas rochas, a variável de

maior influência foi o volume de pasta, seguida pela relação a/c, forma do agregado graúdo e E_c da rocha;

f) para os concretos produzidos com agregados de calcário e granito a variável de maior influência para a resistência a compressão foi a relação a/c, seguida do volume de pasta e E_c da rocha. Já para o módulo de elasticidade do concreto a variável de maior impacto é o volume de pasta, seguida pela relação a/c e E_c da rocha;

g) indiferentemente do tipo de rocha estudada, a maioria das interações das variáveis se mostraram estatisticamente significativas para as propriedades do concreto (resistência à compressão e módulo de elasticidade), mas no aspecto prático não apresentam grande influência, pois o teste F mostra menor impacto que as variáveis principais.

h) o modelo de previsão proposto para o módulo de elasticidade do concreto ($E_{ci} = 27,5234 - 0,6148 \cdot VP + 0,2103 \cdot f_{cj} + 0,1435 \cdot F + 0,2256 \cdot MER$), $R^2 = 0,82$, se mostrou adequado, ficando entre os três melhores modelos dentre os oito modelos validados por este trabalho;

i) os modelos de previsão para o módulo de elasticidade que se mostram mais adequados para representar os valores experimentais foram o proposto por este trabalho, seguido pelos modelos Fib Modelo Code (2010) e EUROCODE 2 (2004).

j) o modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto indicado pela NBR 6118 (ABNT, 2014) não representa os valores experimentais, pois evidenciou-se erros altos e coeficientes estatísticos baixos em relação aos demais modelos validados na presente pesquisa.

Diante do exposto pode-se inferir que o modelo proposto pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) para a previsão do módulo não representa os valores reais. Fica evidente que o modelo proposto por esta norma precisa ser readequado para que o mesmo possa ser aplicado e resultar em valores confiáveis.

Vale frisar que é importante considerar todas as variáveis que se mostraram estatisticamente significativas para o módulo de elasticidade do concreto para formular o modelo de previsão do mesmo, pois quando se considera apenas o f_{ck} e o tipo de agregado graúdo, pode-se estar cometendo equívocos. Com efeito, em relação ao tipo de agregado, muitas vezes a classificação petrográfica e o nome comercial de venda do agregado são diferentes na região em que os mesmos são comercializados, influenciando, assim, nos dados de entrada dos modelos de previsão e, conseqüentemente, no resultado do módulo estimado, principalmente quando não se tem demais variáveis como dado de entrada no modelo para que possa contornar essa situação.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o número reduzido de trabalhos que estudam a influência das variáveis sobre o módulo de elasticidade do concreto, é necessário que continuem os estudos para desvendar outros parâmetros que venham a influenciar no mesmo. Como concluiu-se, existem modelos de previsão para o módulo, mas muitos não representam os resultados experimentais, como exemplo temos a norma brasileira, conforme confirmaram os dados da validação do modelo de previsão proposto pela mesma. Desta maneira, torna-se preocupante a aplicação de modelos como este, e sugere-se que em próximos trabalhos sejam abordados os seguintes assuntos:

- ✓ analisar o módulo de elasticidade do concreto com rochas coletadas de mais locais do país, com a mesma litologia;
- ✓ fornecer maior quantidade de dados referente as propriedades dos materiais que compõem o concreto, para permitir o aprimoramento deste modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto;
- ✓ validar a equação para a previsão do módulo de elasticidade do concreto proposta por esta pesquisa;
- ✓ comparar o módulo de elasticidade do concreto quando se utilizam rochas com diferentes litologias, mas com módulo de elasticidade iguais e mesmo índice de forma;
- ✓ verificar se o tipo de cimento influencia no módulo, a partir da comparação de diferentes composições;
- ✓ investigar a influência do empacotamento dos agregados no módulo de elasticidade do concreto;
- ✓ analisar as consequências ocorridas em obras quanto ao dimensionamento estrutural e os efeitos de segunda ordem quando o módulo de elasticidade se apresenta diferente do estimado pelo modelo de previsão proposto pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

7 REFERÊNCIAS

ABU TAQA AG, ABU AL-RUB RK, SENOUCI A, AL-NUAIMI N, BANI-HANI KA. The Effect of Interfacial Transition Zone Properties on the Elastic Properties of Cementitious Nanocomposite Materials. **Journal of Nanomaterials**. 2015;2015:13.

ABRAMS, D. A. **Bulletin 1: Design of Concrete Mixtures**. Chicago, Structural Materials Reserch Laboratory, Lewis Institute, 1918.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655** - Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Procedimento. ABNT, Rio de Janeiro. 2015.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 8522**: Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 8802**: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial: especificação. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

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

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7389**: Análise petrográfica de agregado para concreto Parte 2: Agregado graúdo. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9479**: Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 10341**: **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 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 75 µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 65**: Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597-09**: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. W. Conshohocken, PA, 2009.

_____. **ASTM E1876-09**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. W. Conshohocken, 2000.

_____. **ASTM C469 / C469M - 14**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. W. Conshohocken, PA, 2014

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 214**: "Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete (ACI 214R-11)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2011, 20 pp.

_____. **ACI 318M-11**: structural building code. Michigan, 2011.

_____. **ACI 318**, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 519 pp.

_____. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14): An ACI Standard: Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), an ACI Report, American Concrete Institute, 2014.

_____. **ACI 363**: Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-10), ACI, Farmington Hills, MI, 2010, p. 27.

AITCIN, P.C., METHA, P.K., "Effect of coarse-aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete", **ACI Materials Journal**, v. 87, n. 2, pp. 103-107, March-April, 1990.

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.

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.

ARAÚJO, J. M. O módulo de deformação longitudinal do concreto. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, nº1, 2000.

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, 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.

ARNDT, J.A.; SOUZA, J.; BIANCHINI, M. Influência do índice de forma do agregado graúdo na resistência a compressão do concreto, **Anais de 49º. Congresso Brasileiro do Concreto**. Bento Gonçalves – RS, 2007.

ALEXANDER, M.; MINDESS, S. Special aggregates and special concretes. **Aggregates in concrete**, p. 361-368, 2005.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; AND ÇELIK, T., “Effect of Coarse Aggregate Size and Matrix Quality on ITZ and Failure Behavior of Concrete under Uniaxial Compression,” **Cement and Concrete Composites**, V. 26, No. 6, 2004, pp. 633-638. doi: 10.1016/S0958-9465(03)00092-1.

AHMAD, Shamsad; ALGHAMDI, Saeid A. A study on effect of coarse aggregate type on concrete performance. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 37, n. 7, p. 1777-1786, 2012.

ASEF, Mohammad Reza; FARROKHROUZ, Mohsen. A semi-empirical relation between static and dynamic elastic modulus. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 157, p. 359-363, 2017.

ASLANI, F., AND NEJADI, S., “Mechanical Properties of Conventional and Self-Compacting Concrete: An Analytical Study,” **Construction and Building Materials**, V. 36, 2012, pp. 330-347. doi: 10.1016/j. conbuildmat.2012.04.034.

AVELINO, Veruska Kelly Gomes Rocha. **Estudo do Comportamento no Estado Fresco e Endurecido do Concreto com Incorporação de Resíduo de Corte de Botão**. 2011. 111 f. 66 Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BAALBAKI et al., "Influence of coarse aggregate on elastic proprieties of high performance concrete". **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 5, pp. 499-503, 1991.

BARBOSA, A. H.; LOPEZ-YANEZ, P. A.; CARNEIRO, A. M. P. Contribuição à obtenção do módulo de elasticidade do concreto utilizando modelagem micromecânica. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 4, n. 5, p. 863-881, 2011.

BATISTA, JOÃO. L. F. **Análise de Regressão Aplicada**. Departamento de Ciências Florestais. USP, 2004.

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.

BAWA, N. S.; GRAFT-JOHNSON, J. W. S. Effect of Mix Proportion , Water-Cement Ratio , Age and Curing Conditions on the Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. **Build. Sci.**, v. 3, p. 171–177, 1969.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. **Construction and building materials**, v. 17, n. 2, p. 97-103, 2003.

BENETTI, J. (2012). **Avaliação do Módulo de Elasticidade Dinâmico de Concreto Produzido com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Brasil.

BITTENCOURT, R. M.; FARIAS, L. A.; INÁCIO, J. J.; MARQUES, R. A. Relatório do XIX Programa Interlaboratorial de Ensaios de Concreto/2013, **Furnas Centrais Elétricas S.A., à Comissão Técnica de Laboratórios de Ensaios em Construção Civil do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO-CTLE-01), Goiânia**, 2014.

BILIR, T., "Investigation of Performances of Some Empirical and Composite Models for Predicting the Modulus of Elasticity of High Strength Concretes Incorporating Ground Pumice and Silica Fume," **Construction and Building Materials**, V. 127, 2016, pp. 850-860. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.054.

BEUSHAUSEN, Hans; DITTMER, Thomas. The influence of aggregate type on the strength and elastic modulus of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 132-139, 2015.

B. LIU, W. LV, L. LI, P. LI, Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete, **Construction and Building Materials**. 69 (2014) 133-142.

BENTZ, D.; JONES, S.; STUTZMAN, P.; ARNOLD, J.; BOISCLAIR, M.; ROTHFELD, P.; TANESI, J.; KIM, H.; MUNOZ, J.; AND BEYENE, M., "Influence of Aggregate Characteristics on Concrete Performance," **Technical Note (NIST TN)-1963**, May 2017, 109 pp

BEZERRA, A. C. S.; SILVA, F. M.; SOARES, M. M. N. S.; AGUILAR, M. T. P. Relações do módulo de elasticidade dinâmico, estático e resistência à compressão do concreto. In: 51º **Congresso Brasileiro do Concreto**, Curitiba, Brasil, 2009.

BILESKEY, 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.

BOUMIZ, A. et al. Modelling the development of the elastic moduli as a function of the degree of hydration of cement pastes and mortars. In Nonat A. (Ed.). **Proceedings 13 of the 2nd RILEM Workshop on Hydration and Setting: Why does cement set? An interdisciplinary approach**, Dijon, 1997.

BORIN, L. A.; BAUER, R. J. F.; FIGUEIREDO, A. D. Risco de rejeição de concretos devido à não conformidade com os parâmetros normalizados para o módulo de elasticidade. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 4, No. 2, 2012, pp. 79-89.

BUI, Ngoc Kien; SATOMI, Tomoaki; TAKAHASHI, Hiroshi. Mechanical properties of concrete containing 100% treated coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 496-507, 2018.

BUNTARA STHENLY GAN et al., The behavior of graded concrete, an experimental study, **Procedia Eng.** 125 (2015) 885–891.

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.

COOK DC. **The tensile creep of concrete**. Dissertation. The University of Calgary, Alberta, Canada; 1969.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CANESSO, F.; CORREA, E.; SILVA, A.; AGUILAR, M.; CETLIN, P. (2008), Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático do Concreto. **18º BECiCMat**. Porto de Galinhas, Brasil.

C.M. NEUBAUER, H.M. JENNINGS, E.J. GARBOCZI, A three-phase model of the elastic and shrinkage properties of mortar, **Adv. Cem. Based Mater.** 4 (1) (Jul 1996) 6–20.

CHRISTARAS, B., AUGER, F., MOSSE, E., 1994, Determination of the moduli of elasticity of rocks: Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods, **Journal of Materials and Structures**, Vol. 27, pp. 222-228, DOI: 10.1007/BF02473036.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code** 1990. Lausanne, 1993.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON. **FIB Model Code**. Lausanne: CEB, 2010.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of Coarse Aggregate Quality on the Mechanical Properties of High Strength Concrete. **Constructions and Building Materials**, v. 17, n. 1, p. 97-103, mar. 2003.

Dalibor Kocab, Barbara Kucharczykova, Petr Misak, Petr Zitt, and Monika Kralikova. "Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions" **Procedia Engineering**, vol. 195, 2017. doi:10.1016/j.proeng.2017.04.529

DAMIDOT, D.; VELEZ, K.; SORRENTINO, F. Characterisation of interstitial transition zone (ITZ) of high performance cement by nanoindentation technique. **11th International Congress on the Chemistry of Cement**, Durban, 2003.

DAVIS RE, TROXEL. Modulus of elasticity and Poisson's ratio for concrete, and the influence of age and other factors upon these values. **Proc Am Soc Test Mater** 1929;29:678-710.

DEL BOSQUE, IF Sáez et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 81, p. 25-34, 2017.

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 SCHUTTER, G. (2014). Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes. **Cement and Concrete Composites**, 54, 53-61.

DEMARCHI, R. A. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à produção do material**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

DIOGENES, H. J. F. et al . Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo , v. 4, n. 5, p. 803-813, Dec. 2011.

EISSA, E.A., KAZI, A., 1988, Relation Between Static and Dynamic Young's Moduli of Rocks, **Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanic Abstract**, Vol. 25, No. 6, pp. 479-482.

ERDOGAN, S. T.; FOWLER, D. W. Determination of aggregate shape properties using x-ray tomographic methods and the effect of shape on concrete rheology. **Research Report ICAR 106-1. International Center for Aggregates**, The University of Texas at Austin, 2005.

ELSHARIEF, M.D. COHEN, J. OLEK, Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone, **Cem. Concr. Res.** 33 (2003) 1837–1849.

EQUIPE ESTATCAMP (2014). Software Action. Estatcamp- Consultoria em estatística e qualidade, São Carlos - SP, Brasil. URL <http://www.portaction.com.br/>.

FAHIMIFAR, A., SOROUGH, H., 2003, Evaluation of some physical and mechanical properties of rocks using ultrasonic pulse technique and presenting equations between dynamic and static elastic constants, South African Institute of Mining and Metallurgy– **Technology roadmap for rock mechanics**, ISRM.

FEDERATION INTERNATIONALE DU BETON. **Fib Bulletin 55: Model Code 2010**, First complete draft, v. 1, 2010.

FREITAS Jr. J.A. **Materiais de Construção (TC-031) Agregados**. 2013. 110f. Apresentação Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2013.

GIAMMUSSO, S, E. **Manual do Concreto**. São Paulo. PINI, 1992.

GIACCIO, G., ROCCO, C., VIOLINI, D., ZAPPITELLI, J., ZERBINO R., "High strength concretes incorporating different coarse aggregates", **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 3, pp. 292 - 246, 1992.

GAGLIARDO, D.P; VIDAL, P.A ; GAGLIARDO, J.C . Influência da granulometria do agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto de cimento portland. **In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto**, Fortaleza, Brasil, 2010.

GARBOCZI, E.J. et al. An electronic monograph: modeling and measuring the structure and properties of cement-based materials. **Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology**, Gaithersburg. Acesso em Janeiro, 2006.

GLEN A. KOLLMORGEN, **Impact of age and size on the mechanical behavior of an ultra high performance concrete** (Doctoral dissertation), Michigan Technological University, 2004.

GIACCIO G, ROCCO C, VIOLINI D, ZAPPITELLI J, ZERBINO R (1992) High-strength concretes incorporating different coarse aggregates. **ACI Mater J** 89(3): 242-246.

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.

GUÉNOT-DELAHAIE, I. **Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton**. These de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1996.

GUDMUNDSSON, J. G. Long-term creep and shrinkage in concrete using porous aggregate – the effects of elastic modulus. 2013. 80 p. Thesis (Master of Science) - **School of Science and Engineering**, Reykjavík University, Iceland, 2013.

HAECKER, C. -J. et al. Modeling the linear elastic properties of Portland cement paste. Disponível em: <<http://ciks.cbt.nist.gov/~garbocz/paper148/index.html>>. Acesso em 10 de agosto de 2020.

HARSH, S.; SHEN, Z.; DARWIN, D. Strain-rate sensitive behavior of cement paste and mortar in compression. **ACI Materials Journal**, v. 87, No. 5, 1990, pp. 508-516.

HARTMANN, CARINE T. & HELENE, PAULO. **Concretos de Alta Resistência**. Técnica, Revista de Tecnologia da Construção, PINI, v.1, p.15 – 17. 2003

HELVATJOGLU, A. M., PAPADOGIANNISA, Y., LAKESB, R. S., DIONYSOPOULOSA, P., PAPADOGIANNISA, D., 2006, Dynamic and static elastic moduli of packable and flowable composite resins and their development after initial photo curing, **Journal of Dental Materials**, Vol. 22, pp. 450–459, DOI: 251 10.1016/j.dental.2005.04.038.

HICKEL, G. C., BOAVENTURA, G. C., SOUZA, R. A. D., CALÇADA, L. M., CASALI, J. M., BETIOLI, A., & OLIVEIRA, A. L. D. (2018). Influência do tipo de britador na forma dos grãos de agregados miúdos de britagem. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, 11(4), 902-930.

H.M. JENNINGS, A model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste, **Cem. Concr. Res.** 30 (1) (2000) 101–116.

H.M. JENNINGS. Colloid model of C -S - H and implications to the problem of creep and shrinkage, **Mater. Struct.** 37 (1) (2004) 59–70.

H. BESHAR, A.A. ALMUSALLAM, M. MASLEHUDDIN, Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete, **Constr. Build. Mater.** 17 (2003) 97–103.

HUSSAIN R.R., SHURAIM A.B., ASLAM F., ALHOZAIMY A.M.A., Al-Humaiqani M.M., 2018, Coupled effect of coarse aggregate and micro-silica on the relation between strength and elasticity of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 321-332, 2018.

HELENE, PAULO R.L.; MONTEIRO, PAULO J.M. Designing Concrete Mixtures for Strength, Elastic Modulus and Fracture Energy. **Materials and Structures**, v.26, n.162, Oct. 1993 p.443-452.

Jalal, M., Nassir, N., & Jalal, H. (2019). Waste tire rubber and pozzolans in concrete: a trade-off between cleaner production and mechanical properties in a greener concrete. **Journal of Cleaner Production**, 117882. doi:10.1016/j.jclepro.2019.117882.

JOHNSTON CD. **Concrete and its constituent materials in uniaxial tension and compression**. Dissertation. Queens University of Belfast, Belfast, Northern Ireland; 1967.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 2002. 5ª Ed.

J. MA, M. ORGASS, F. DEHN, D. SCHMIDT, N.V. TUE, Comparative investigations on

ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates, **in: Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete**, Germany, 2004, pp. 205–212.

JIN L, ZHANG R, DU X, LI Y. Multi-scale analytical theory of the diffusivity of concrete subjected to mechanical stress. **Construction and Building Materials**. 2015;95:171-85.

JÚNIOR, ARAÚJO; *et. al.* Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto através dos ensaios de resistência à compressão e velocidade de propagação de onda ultrassônica. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON)**. Foz do Iguaçu, 2018.

JUROWSKI, KRYSZTIAN; GRZESZCZYK, STEFANIA. The influence of concrete composition on Young's modulus. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 584-591, 2015.

JOHARI, M. M., BROOKS, J. J., KABIR, S., & RIVARD, P. (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, 25(5), 2639-2648.

KING, M.S., 1983, Static and dynamic elastic properties of rocks from the Canadian shield, **Technical note, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, Vol. 20, No. 5, pp. 237– 241, DOI: 10.1016/0148-9062(84)90037-8.

KHALAF, F. M. Using Crushed Clay Brick as Aggregate in Concrete. // **Journal of Materials in Civil Engineering**. 18(2006), pp. 518-526.

Klein, N. S., Lenz, L. A., & Mazer, W. (2020). Influence of the granular skeleton packing density on the static elastic modulus of conventional concretes. **Construction and Building Materials**, 242, 118086. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118086.

KOCKAL, N., “Validity and Reliability of Estimated Modulus of Elasticity of Cementitious Materials,” **IOP Conference Series. Materials Science and Engineering**, V. 103, 2015, p. 012024 doi:10.1088/1757-899X/103/1/012024.

Kolias, S., & Georgiou, C. (2005). The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete. **Cement and Concrete Composites**, 27(2), 211–216. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.009

Konsta-Gdoutos, M. S., Danoglidis, P. A., & Shah, S. P. (2019). High Modulus Concrete: Effects of low carbon nanotube and nanofiber additions. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, 102295. doi:10.1016/j.tafmec.2019.102295.

KIM, JIN-KEUN; HAN, SANG HUN; SONG, YOUNG CHUL. Effect of temperature and aging on the mechanical properties of concrete: Part I. Experimental results. **Cement and Concrete research**, v. 32, n. 7, p. 1087-1094, 2002.

KILIÇ A, ATIS CD, TEYMEN A, KARAHAN O, ÖZCAN F, BILIM C. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. **Cem Concr Compos** 2008;30(4):290–6.

K.-R. WU, B. CHEN, W. YAO, D. ZHANG, Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete, **Cem. Concr. Res.** 31 (2001) 1421–1425.

KOVLER K, BENTUR A. Cracking sensitivity of normal- and high-strength concretes. **ACI Mater J** 2009;106(6):537–42.

Laserna, S.; Montero, J. (2016) Influence of natural aggregates typology on recycled concrete strength properties. **Construction and Building Materials**, vol. 115, p. 78-86.

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.

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, Z. (2011) “**Advanced concrete technology**”, New Jersey: John Wiley e Son, Inc., 506p.

LI, G., ZHAO, Y., PANG, S. S., & LI, Y. (1999). Effective Young's modulus estimation of concrete. **Cement and Concrete Research**, 29(9), 1455-1462.

L. KUCHARSKA, W/c ratio as an indication of the influence of ITZ on the mechanical properties of ordinary concretes and HPS (in polish), **in: Proc. 2nd Conf. Material Problems in Civil Engineering, Mogilany**, Cracow University of Technology, 1998, pp. 241–250.

L. HONG, X. GU, F. LIN, Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete, **Constr. Build. Mater.** 65 (2014) 338–349.

LEE, M.D. COHEN, **Strength and durability of concrete: effects of cement paste-aggregate interfaces**. Part II: Significance of transition zones on physical and mechanical properties of portland cement mortar, Final report FHWA/IN/ JHRP-97/4 Purdue University, 1998.

LEE, B. J., KEE, S. H., OH, T., & KIM, Y. Y. (2015). Effect of cylinder size on the modulus of elasticity and compressive strength of concrete from static and dynamic tests. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2015.

LI L, AUBERTIN M. A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials. **Can J Civ Eng** 2003;30:644–58.

LIAN C, ZHUGE Y, BEECHAM S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. **Constr Build Mater** 2011;25:4294–8.

LIAN C, ZHUGE Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete – an experimental investigation. **Constr Build Mater** 2010;24(12):2664–71.

LIU, X., LIU, J., YANG, Y., CHENG, G., & LANNING, J. (2020). Resistência de colunas tubulares de aço preenchidas com concreto de forma especial à compressão e flexão. **Journal of Construction Steel Research**, 169, 106038. doi: 10.1016 / j.jcsr.2020.106038

LU, X.; SUN, Q.; FENG, W.; TIAN, J. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. **Construction and Building Materials**, v. 47, 2013, pp. 231- 239.

LYDON, F. D.; IACOVU, M. Some Factors Affecting The Dynamic Modulus Of Elasticity Of High Strength Concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 6, p. 1246–1256, 1995.

LODI, Victor Hugo. **Viabilidade Técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó- SC**. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006

M. ZHANG, A. JIVKOV, Micromechanical modelling of deformation and fracture of hydrating cement paste using X-ray computed tomography characterisation, **Composites Part B: Engineering**. 88 (2016) 64-72.

MALACHANNE, Etienne et al. A cohesive zone model for the characterization of adhesion between cement paste and aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 64-71, 2018.

MENDES, T M. **Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas**. 2008. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MONDAL P, SHAH SP, MARKS LD. Nanomechanical Properties of Interfacial Transition Zone in Concrete. **Nanotechnology in Construction** 3, Proceedings. 2009:315-20.

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**. 2007. 261 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. (1994). **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini.

METHA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4º edição, Ed Ibracon. 2014.

MENEGATTI, L.C.; ROCHA, C, A, Influência do teor de pasta de cimento na permeabilidade e na resistência do concreto permeável. **Anais de 61º. Congresso Brasileiro do Concreto**. 2019.

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.

M. JEBLI, F. JAMIN, E. GARCIA-DIAZ, M. EL OMARI, M.S. EL YOUSOUFI, Influence of leaching on the local mechanical properties of an aggregate-cement paste composite, **Cem. Concr. Compos.** (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.001>.

M. SAFIUDDIN, S. RAMAN, M. ZAIN, Effects of Medium Temperature and Industrial By-Products on the Key Hardened Properties of High Performance Concrete, **Materials**. 8 (2015) 8608-8623.

M. MASLEHUDDIN, M. IBRAHIM, M. SHAMEEM, M. ALI, M. AL-MEHTHEL, Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete, **Construction and Building Materials**. 41 (2013) 634-641.

M. UDDIN, M. JAMEEL, H. SOBUZ, M. ISLAM, N. HASAN, Experimental study on strength gaining characteristics of concrete using Portland Composite Cement, **KSCE Journal of Civil Engineering**. 17 (2013) 789-796.

MASSUCATTO, C. J.; BASSANI, F.; PAULON, V. A. Contribuição experimental sobre o módulo de elasticidade secante para determinação de esforço solicitante e verificação de estados limites de serviço. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO**, 45. 2003, Vitória. Anais...IBRACON, 2003.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo: IBRACON, 2ed, 2014, 782 p.

MELO NETO, A. A.; HELENE, PR do L. Módulo de elasticidade: dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 44º, Belo Horizonte. 2002.

M. UYSAL, The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete, **Constr. Build. Mater.** 37 (2012) 533– 540.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini.1982

NEVILLE AM. Properties of Concrete. 4rd Ed. **Cracow: Polski Cement**; 2000 (in Polish).

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. 5th ed. England: Pearson, 2011

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2015.

NUMMER, ANDRÉA. Análise Petrográfica. Universidade Federal de Santa Maria. 2020.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: **Fazendo Arte Editorial**, 2000.

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.

OTANI, ENG LUCAS BARCELOS; PEREIRA, ANTÔNIO HENRIQUE ALVES; FÍSICA, ATCP Engenharia. Estimativa do módulo de elasticidade estático de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso. **ATCP Engenharia Física**, p. 38, 2015.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G.C. (Ed.), **Concreto: Ciência e Tecnologia**, IBRACON, São Paulo, 2011: p. 585.

PACHECO, R, F, R. **Análise do Módulo de elasticidade e resistência à compressão de concretos produzidos em Centrais na Grande Vitória**. Experimentais e estatística. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santos. Vitória, ES. 2006.

PIASTA, Wojciech; GORA, Jacek; BUDZYŃSKI, Waldemar. Stress-strain relationships and modulus of elasticity of rocks and of ordinary and high performance concretes. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 728-739, 2017.

PINEAUS A, CABRILLAC R, RÉMOND S, PIMIENTA P, RIVILLON P. Mechanical properties of self-compacting concrete – influence of composition parameters. In: Shah SP, editor. Proceedings of 2nd North-American conference on the design and use of self-consolidating concrete and the 4th international RILEM symposium on self-compacting concrete. Chicago: **Hanley Wood Publications**; 2005. p. 863–8.

PADHI, R. S.; PATRA, R. K.; MUKHARJEE, B. B.; DEY, T. Influence of incorporation of rice husk ash and coarse recycled concrete aggregates on properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 289-297, 2018.

PAULON, V.A. A microestrutura do concreto convencional. In: ISAIA, G.C. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: **Ibracon**, 2005. Vol. 1, cap. 19, p. 583- 604.

PECELLI DE ANDRADE, W. P. **Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades**. São Paulo. Editora Pini, 1997.

PEREIRA, A.H.A. & RODRIGUES, J.A. Incerteza de medição do módulo de Young de materiais por métodos não destrutivos adotando-se um valor estimado para a razão de Poisson. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Anais...**, 2010

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

RASHID MA, MANSUR MA, ASCE M, PARAMASIVAM P. Correlations between mechanical properties of high-strength concrete. **J Mater Civ Eng** 2002;14:230–8

RICARDO A.EINSFELD, MARTA SL VELASCO (2006) Fracture parameters for high-performance concrete. **Cem and Conc Res** 36:576- 583. doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.09.004 19.

P NETO, B. B.; OLIVEIRA, D. R. C.; RAMOS, D. Efeitos do tipo, tamanho e teor de agregado graúdo no módulo de deformação do concreto de alta resistência. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 16, n. 2, p. 690-702, 2011.

- ROHDEN, A., BRESCOVIT, A., KIRCHHEIM, A., & MOLIN, D. (2011). Efeito do teor de agregado graúdo na resistência à tração do concreto de alto desempenho. **In ANAIS DO 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.**
- RODHEN, Abrahão Bernardo. **Contribuição aos métodos de dosagem de concreto de alta resistência a partir do entendimento da influência dos agregados na mistura.** Porto Alegre – RS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 2015.
- ROSSIGNOLO, J. A. Módulo de deformação do concreto leve estrutural de alto desempenho. **Revista Minerva – Pesquisa & Tecnologia**, 2005.
- SHEHATA, L.D. Deformações instantâneas de concreto. In: ISAIA, G.C. (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: **IBRACON**, 2005.
- SWAMY, N.; RIGBY, G. (1971). Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. **Matériaux et Constructions. Paris**, 4(19): 13-40, jan./fev. 1971.
- SHKOLNIK, I. E. Influence of high strain rates on stress–strain relationship, strength and elastic modulus of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 30, 2008, pp. 1000-1012.
- SOUZA, PAULO SÉRGIO LIMA *et al.* Assessment of the modulus of elasticity in concrete with high reactivity metakaolin from industry. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 20, n. 4, p. 982-991, 2015.
- SHARIQ, Mohd; PRASAD, Jagdish; ABBAS, H. Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 411-418, 2013.
- SIDERIS, K.K.; MANITA, K.; SIDERIS, K. Estimation of ultimate modulus of elasticity and Poisson ratio of normal concrete. **Cement and Concrete Composites, Barking**, v.26, p.623-631, 2004.
- 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, 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, Rui Vasco; DE BRITO, Jorge; DHIR, Ravindra Kumar. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. **Journal of cleaner production**, v. 112, p. 2171-2186, 2016.
- SHOUKRY, S. N., WILLIAM, G. W., DOWNIE, B., & RIAD, M. Y. (2011). Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, 25(2), 688-696.

SANTOS, ANTONIO CARLOS DOS *et al.* Comparative study between theoretical values and experimental results of concrete elasticity modulus produced with different types of coarse aggregate. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 281-294, 2017.

SANTOS, DIEGO DAJORI DOS. GODINHO, DAIANE DOS SANTOS DA SILVA. **Análise da evolução das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo**. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. 2018.

S. FIC, M. SZELAG, Analysis of the development of cluster cracks caused by elevated temperatures in cement paste, **Constr. Build. Mater.** 83 (2015) 223– 229.

SBRIGHI NETO, C., In ISAIA, G.C. (Ed). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. Vol. 1, cap 11, **IBRACON** – São Paulo, 2005.

S. HAN, J. KIM, Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete, **Cement and Concrete Research**. 2014 (2014) 1219-1227.

S. SHOUKRY, G. WILLIAM, B. DOWNIE, M. RIAD, Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete, **Construction and Building Materials**. 25 (2011) 688-696.

SILVA, DANILLO DE ALMEIDA; GEYER, ANDRÉ LUIZ BORTOLACCI. Estudo da forma do agregado graúdo e sua influência no módulo de elasticidade do concreto. **XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas**. Crato – Ceará – Brasil. 2017.

STATSOFT, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 12. (www.statsoft.com).

TIBBETTS, Caitlin M. et al. Aggregate Correction Factors for Concrete Elastic Modulus Prediction. **ACI Structural Journal**, v. 115, n. 4, p. 931-941, 2018.

TIBONI, Rafaelle. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2. ed. London: Thomas Telford, 1997.

TORALLES CARBONARI, M. B. **Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones**. Diss. Tese de Doutorado, ETSECCPB–Universitat Politècnica de Catalunya, Departament D’Enginyeria de la Construcció, Barcelona, Espanha, 1996.

UYSAL M. The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. **Constr Build Mater** 2012;37: 533–40.

VIAPOL. Guia de Produtos. Manual. 2017

X. ZHU, Y. GAO, Z. DAI, D.J. CORR, S.P. SHAH, Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete, **Cement and Concrete Research** 107 (2018) 49-63.

XIE Y, CORR DJ, JIN F, ZHOU H, SHAH SP. Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC). **Cement & Concrete Composites**. 2015;55:223- 31.

ZHAO, Hui; LIU, Faqi; YANG, Hua. Residual compressive response of concrete produced with both coarse and fine recycled concrete aggregates after thermal exposure. **Construction and Building Materials**, v. 244, p. 118397, 2020.

ZDEB, TOMASZ; HAGER, Izabela; ŚLIWIŃSKI, Jacek. Reactive powder concrete—change in compressive strength and modulus of elasticity at high temperature. **In: Brittle Matrix Composites** 10. 2013. p. 135-143.

Y. ZHOU, J. GAO, Z. SUN, W. QU, A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete, **Construction and Building Materials**, 98 (2015), 137–145, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.110.

ZHOU, F.P., BARR, B.I.G., LYDON, F. D., "Fracture proprieties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates", **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 3, pp. 543 - 552, 1995.

YANG, Huaquan; RAO, Meijuan; DONG, Yun. Influence study of extra-large stone limited size and content on full-graded concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 774-783, 2016.

YILDIRIM, HASAN; SENGUL, Ozkan. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1645-1652, 2011.

JING YU; HAO-LIANG WU; DHANADA K. MISHRA; BGENGYING LI; CHRISTOPHER KY LEUNG. Compressive strength and environmental impact of sustainable blended cement with high-dosage Limestone and Calcined Clay (LC2). **Journal of Cleaner Production**. Volume 278, 2021.

WANG, H.; LI, Q.; Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete. **International Journal of Solids and Structures** 44 . 2007.

WEIZENMANN, Rodrigo Nicolini. **Estudo sobre a influência da variação da dimensão máxima característica do agregado graúdo sobre o módulo de elasticidade do concreto**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento Portland**. Florianópolis, 2008, Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 271 fls.

WU KR., CHEN B, YAO W, ZHANG D (1997) Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cem and Conc Res**, 31(10):1421-1425. doi.org/10.1016/S0008- 8846(01)00588-9 20.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n.C5,

p.8995-9005, 1985.

WITTMANN FH. Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete.
Sadhana 2002;27(4):413–23.

ANEXO A

Análise petrográfica - Norma Técnica -NBR 7389

Metodologia : Foram descritas macroscopicamente as amostras de rocha de 4 pedreiras diferentes.

CONPASUL – BUTIÁ

TIPO

Amostra de mão



Fotografia mostra minerais esverdeados referentes a argilização dos feldspatos.

COR

No estado seco: rosado

No estado úmido: rosado

TEXTURA E ESTRUTURA

Rocha holocristalina, fanerítica grossa a muito grossa, inequigranular (pórfiros ou fenocristais de feldspatos potássicos com até 4 cm de diâmetro e de quartzo, menos comum). A amostra de mão apresenta estrutura maciça, porém, estudos microscópicos das rochas desta pedreira indicam a presença de grãos de quartzo e feldspatos quebrados e formação de subgrãos e microfraturas, como efeito da tectônica que atuou no maciço (considerando o tempo geológico).

ESTADO DE ALTERAÇÃO

Macroscopicamente a rocha mostra pouca alteração, evidenciada pela perda de brilho de alguns minerais de feldspato e algumas porções da rocha com tons esverdeados relacionados a argilização dos feldspatos e da biotita que origina minerais como clorita e sericita. Essas características permitem classificar a rocha como – A2 (DNER-IE 006/94).

COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Rocha formada por cristais bem desenvolvidos, textura inequigranular porfirítica

Mineralogia

1 – Quartzo: Mineral vítreo, incolor a luz natural, sem alteração, anédrico, 25% da amostra.

2- Plagioclásio: Mineral vítreo, branco subédrico. Em grãos e maior tamanho é possível ver as maclas polissintéticas. Apresentam alteração hidrotermal esverdeada, 20% da amostra;

3 – Feldspato Alcalino: Mineral vítreo rosado, euédrico a subédricos. Formam fenocristais na rocha e, em alguns grãos maiores, pode-se ver maclas de geminação dupla. Apresenta alteração hidrotermal em graus variados nos seus grãos. Compõe 45% da amostra ;

4 –Biotita: Mineral vítreo, marrom escuro a preto, forma pequenas ripas com clivagem excelente, compõe 8% da amostra.

5 – Minerais opacos: Minerais de cor preta, muito pequenos, anédricos . Pode se tratar de magnetita ou Ilmenita, compondo 2% da amostra.

CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA : Rocha Ígnea Plutônica - SIENOGRANITO

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como muito coerente (C1 - DNER-IE 006/94).

POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO DO AGREGADO

A rocha se apresenta com argilização dos feldspatos o que pode influenciar na absorção e adesividade, bem como evidências de cataclase, que afeta a forma da pedra britada.

COMPASUL - ESTRELA

TIPO

Amostra de mão.



Fotografia: fragmento de uma disjunção colunar com superfície de alteração de cor bege a amarelado

COR

No estado seco: cinza esverdeado com manchas cinza escuro

No estado úmido: cinza escuro

TEXTURA E ESTRUTURA

Rocha inequigranular, microporfirítica com fenocristais prismáticos de plagioclásio e secundariamente piroxênios dispersos em matriz fanerítica média a fina de difícil identificação em amostra de mão pelo tamanho reduzido dos minerais.

ESTADO DE ALTERAÇÃO

Estudos microscópicos das rochas desta pedreira indicam alteração por óxidos de ferro nas bordas e fraturas dos minerais máficos e opacos e alterações intempéricas e hidrotermais formando minerais secundários como argilo-minerais, epidotos e cloritas. Classificada como rocha pouco alterada – A1 (DNER-IE 006/94).

COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Rocha cristalina formada por um arranjo de piroxênios, plagioclásios e minerais opacos.

A identificação desta rocha para classificação exata só é possível com lâmina petrográfica pois os minerais são muito pequenos.

Rochas já avaliadas desta pedreira indicam a presença de plagioclásios que ocorrem como fenocristais, compondo aproximadamente 55% em volume da rocha ; Piroxênios, provavelmente pigeonita (40%) e minerais opacos como magnetita e Ilmenitas (5%) que, podem ocorrer como fenocristais (confere um caráter levemente magnético à amostra)

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: Rocha ígnea vulcânica - BASALTO

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 - DNER-IE 006/94).

POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO DO AGREGADO

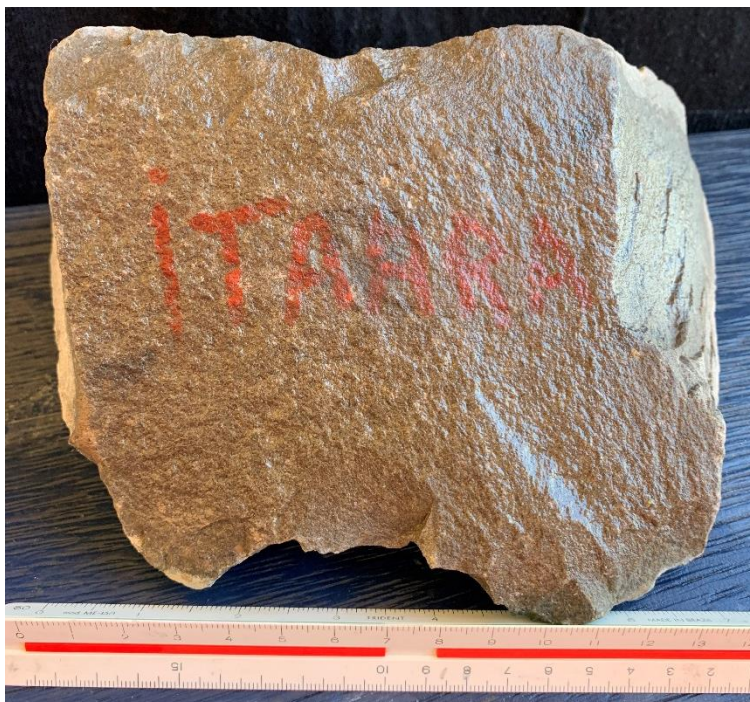
As propriedades petrográficas da amostra analisada, indicam boas condições para uso na construção civil porém, ao longo da pedreira podem ocorrer modificações texturais e de alteração que alteram a qualidade do material.

CONPAUL - ITAARA

COR

No estado seco: cinza claro

No estado úmido: cinza escuro



Fotografia : rocha com textura fanerítica muito fina a afanítica .

TEXTURA E ESTRUTURA

Rocha holocristalina, fanerítica muito fina a afanítica.

ESTADO DE ALTERAÇÃO

Macroscopicamente não são observadas alterações;

Ao microscópico, rochas já avaliadas desta pedreira mostram processos de alteração hidrotermal nos minerais máficos (escuros)

COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

A identificação desta rocha para classificação exata só é possível com lâmina petrográfica pois os minerais são muito pequenos.

Rochas já avaliadas desta pedreira indicam intercrescimento micrográfico de feldspato e quartzo e a presença de minerais opacos com corrosão de bordas e nas microfraturas formando emanções de óxidos de ferro dispersos na amostra

Há uma associação de minerais claros intercrescidos, composta por feldspato alcalino, ripas de plagioclásio e quartzo (aproximadamente 70% da rocha). Os piroxênios são aproximadamente 25 % da rocha e podem ocorrer como microfenocristais alongados.

Os minerais opacos (magnetita e ilmenita) compões 5% da rocha e apresentam comumente exsoluções de óxidos de ferro nas bordas e microfraturas.

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: Rocha ígnea vulcânica- RIODACITO

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como muito coerente (C1 - DNER-IE 006/94).

POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO DO AGREGADO

As propriedades petrográficas indicam boas condições para uso como pedra britada

MÔNEGO – BAGÉ

COR

No estado seco: branca com faixas descontínuas esverdeadas

No estado úmido: permanecem iguais



Fotografia : As cores esverdeadas podem estar associadas a minerais como anfibólios, epidoto e diopsídio.

TEXTURA E ESTRUTURA

Rochas já avaliadas desta pedreira indicam textura granoblástica, representada por minerais carbonatados, equidimensionais, que se agregam uns aos outros sem conferir a rocha orientação preferencial. Ocorrem contatos fendilhados entre os minerais e grãos quebrados

ESTADO DE ALTERAÇÃO

A amostra de mão não apresenta alteração pois os minerais mantêm o brilho original. Minerais quebrados e contatos fendilhados podem indicar que o maciço sofreu esforços tectônicos e são mais propícios a alteração. A2 (DNER-IE 006/94).

COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Rocha cristalina com arranjo de minerais carbonatados. Rochas já avaliadas desta pedreira indicam a presença de aproximadamente 90% de dolomitas (preferencialmente) e 10% de minerais acessórios como anfibólios e epidoto, e serpentinas.

CLASSIFICAÇÃO PETROGRÁFICA: Rocha metamórfica : MÁRMORE DOLOMÍTICO

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, podendo ser classificada como coerente (C1 - DNER-IE 006/94).

POTENCIALIDADE DE UTILIZAÇÃO DO AGREGADO

As propriedades petrográficas indicam boas condições para uso, porém, são comuns as modificações texturais e composicionais ao longo do maciço rochoso.

APÊNDICE A

Tabela 1 – Resultados de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade do Concreto para os traços 1:4,5 (volume de pasta 24,7%)

Traço	Resistência (MPa)	Média	Desvio padrão	Diferença	Módulo (GPa)	Média	Desvio padrão	Diferença
D25 - m4,5	37,4	37,7	0,44	-0,30	38,6	39,0	0,30	-0,37
	37,5			-0,20	38,9			-0,07
	38,2			0,50	39,1			0,13
					39,3			0,33
D35 - m4,5	50,6	50,9	0,25	-0,27	41,6	42,1	0,44	-0,50
	50,9			0,03	41,9			-0,20
	51,1			0,23	42,3			0,20
					42,6			0,50
D45 - m4,5	58,6	59,2	0,55	-0,57	42,6	43,1	0,40	-0,48
	59,2			0,03	42,9			-0,18
	59,7			0,53	43,3			0,22
					43,5			0,42
Intermediário D25 - m4,5	33,8	34,3	0,45	-0,47	39,8	40,4	0,59	-0,63
	34,3			0,03	40,1			-0,33
	34,7			0,43	40,7			0,27
					41,1			0,67
Intermediário D35 - m4,5	46,3	46,8	0,46	-0,50	41,9	42,4	0,46	-0,52
	46,9			0,10	42,2			-0,22
	47,2			0,40	42,7			0,28
					42,9			0,48
Intermediário D45 - m4,5	56,4	56,9	0,45	-0,47	43,6	44,1	0,49	-0,48
	56,9			0,03	43,8			-0,28
	57,3			0,43	44,2			0,13
					44,7			0,63
Sem VSI D25 - m4,5	33,3	33,9	0,55	-0,57	41,2	41,9	0,59	-0,72
	33,9			0,03	41,7			-0,22
	34,4			0,53	42,3			0,38
					42,5			0,58
Sem VSI D35 - m4,5	44,8	45,1	0,25	-0,27	42,2	42,8	0,49	-0,63
	45,1			0,03	42,7			-0,13
	45,3			0,23	43,1			0,27
					43,3			0,47

Sem VSI D45 - m4,5	53,9	54,3	0,35	-0,37	43,2	43,9	0,56	-0,67
	54,3			0,03	43,7			-0,17
	54,6			0,33	44,1			0,23
					44,5			0,63
B25 - m4,5	37,8	38,2	0,46	-0,40	39,4	40,0	0,52	-0,60
	38,1			-0,10	39,8			-0,20
	38,7			0,50	40,2			0,20
					40,6			0,60
B35 - m4,5	48,2	48,5	0,36	-0,30	42,8	43,3	0,48	-0,53
	48,4			-0,10	43,1			-0,23
	48,9			0,40	43,5			0,17
					43,9			0,57
B45 - m4,5	59,7	59,9	0,20	-0,20	44,1	44,7	0,50	-0,55
	59,9			0,00	44,5			-0,15
	60,1			0,20	44,7			0,05
					45,3			0,65
Intermediário B25 - m4,5	36,7	37,2	0,42	-0,47	39,6	40,3	0,54	-0,68
	37,3			0,13	40,2			-0,08
	37,5			0,33	40,4			0,12
					40,9			0,62
Intermediário B35 - m4,5	45,1	45,8	0,65	-0,67	42,1	42,7	0,43	-0,60
	45,8			0,03	42,7			0,00
	46,4			0,63	42,9			0,20
					43,1			0,40
Intermediário B45 - m4,5	55,1	55,5	0,40	-0,43	43,8	44,4	0,44	-0,55
	55,6			0,07	44,2			-0,15
	55,9			0,37	44,6			0,25
					44,8			0,45
Sem VSI B25 - m4,5	32,3	33,0	0,75	-0,70	39,2	39,6	0,39	-0,40
	32,9			-0,10	39,4			-0,20
	33,8			0,80	39,7			0,10
					40,1			0,50
Sem VSI B35 - m4,5	43,7	44,2	0,46	-0,50	42,1	42,6	0,46	-0,48
	44,3			0,10	42,3			-0,28
	44,6			0,40	42,8			0,22
					43,1			0,52
Sem VSI B45 - m4,5	53,5	54,0	0,70	-0,50	42,3	42,9	0,52	-0,60
	53,7			-0,30	42,7			-0,20
	54,8			0,80	43,1			0,20
					43,5			0,60
C25 - m4,5	33,8	34,2	0,45	-0,43	32,1	32,6	0,44	-0,45
	34,2			-0,03	32,3			-0,25
	34,7			0,47	32,7			0,15
					33,1			0,55
C35 - m4,5	44,2	44,9	0,67	-0,73	34,1	34,7	0,44	-0,55

	45,1			0,17	34,5			-0,15
	45,5			0,57	34,9			0,25
					35,1			0,45
C45 - m4,5	53,2	53,6	0,47	-0,37	35,6	36,0	0,31	-0,35
	53,4			-0,17	35,8			-0,15
	54,1			0,53	36,1			0,15
					36,3			0,35
G25 - m4,5	32,8	33,3	0,45	-0,47	31,4	32,0	0,52	-0,55
	33,3			0,03	31,7			-0,25
	33,7			0,43	32,1			0,15
					32,6			0,65
G35 - m4,5	42,7	43,1	0,47	-0,37	34,9	34,6	0,79	0,27
	42,9			-0,17	35,6			0,98
	43,6			0,53	33,8			-0,83
					34,2			-0,42
G45 - m4,5	52,4	53,0	0,67	-0,57	35,6	35,6	0,59	0,05
	52,8			-0,17	34,7			-0,85
	53,7			0,73	35,9			0,35
					36			0,45

Tabela 2 – Resultados de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade do Concreto para os traços 1:6 (volume de pasta 19,8%)

Traço	Resistência (MPa)	Média	Desvio padrão	Diferença	Módulo (GPa)	Média	Desvio padrão	Diferença
D25 - m6	33,9	34,3	0,45	-0,43	44,1	44,6	0,43	-0,52
	34,3			-0,03	44,5			-0,12
	34,8			0,47	44,8			0,18
					45,1			0,48
D35 - m6	45,1	45,6	0,42	-0,47	46,1	46,6	0,44	-0,45
	45,7			0,13	46,3			-0,25
	45,9			0,33	46,7			0,15
					47,1			0,55
D45 - m6	56,3	56,8	0,55	-0,53	46,8	47,2	0,30	-0,38
	56,8			-0,03	47,1			-0,07
	57,4			0,57	47,3			0,13
					47,5			0,33
Intermediário D25 - m6	31,8	32,3	0,57	-0,47	43,2	43,7	0,34	-0,45
	32,1			-0,17	43,6			-0,05
	32,9			0,63	43,8			0,15
					44			0,35

Intermediário D35 - m6	43,7	44,0	0,26	-0,30	44,5	45,0	0,38	-0,48
	44,1			0,10	44,9			-0,08
	44,2			0,20	45,1			0,13
					45,4			0,42
Intermediário D45 - m6	53,1	53,4	0,31	-0,27	45,3	46,0	0,55	-0,70
	53,3			-0,07	45,9			-0,10
	53,7			0,33	46,2			0,20
					46,6			0,60
Sem VSI D25 - m6	31,7	31,9	0,15	-0,17	41,8	42,3	0,39	-0,53
	31,9			0,03	42,3			-0,03
	32,0			0,13	42,5			0,17
					42,7			0,38
Sem VSI D35 - m6	42,1	42,7	0,56	-0,60	44,1	44,6	0,46	-0,47
	42,8			0,10	44,3			-0,27
	43,2			0,50	44,8			0,23
					45,1			0,53
Sem VSI D45 - m6	52,1	52,7	0,60	-0,63	45,1	45,9	0,61	-0,77
	52,8			0,07	45,7			-0,17
	53,3			0,57	46,2			0,33
					46,5			0,63
B25 - m6	35,2	35,7	0,56	-0,50	41,8	42,2	0,35	-0,43
	35,6			-0,10	42,1			-0,13
	36,3			0,60	42,4			0,17
					42,6			0,38
B35 - m6	44,6	44,9	0,31	-0,27	45,2	45,6	0,42	-0,40
	44,8			-0,07	45,3			-0,30
	45,2			0,33	45,8			0,20
					46,1			0,50
B45 - m6	56,8	57,2	0,46	-0,40	46,3	47,0	0,48	-0,65
	57,1			-0,10	46,9			-0,05
	57,7			0,50	47,2			0,25
					47,4			0,45
Intermediário B25 - m6	35,1	35,6	0,56	-0,50	42,3	42,8	0,44	-0,45
	35,5			-0,10	42,5			-0,25
	36,2			0,60	42,9			0,15
					43,3			0,55
Intermediário B35 - m6	43,1	43,6	0,55	-0,53	44,1	45,0	0,75	-0,85
	43,6			-0,03	44,6			-0,35
	44,2			0,57	45,3			0,35
					45,8			0,85
	53,1	53,5	0,59	-0,43	45,8	46,4	0,55	-0,60

Intermediário B45 - m6	53,3			-0,23	46,2			-0,20
	54,2			0,67	46,5			0,10
					47,1			0,70
Sem VSI B25 - m6	31,6	32,2	0,60	-0,63	40,4	40,9	0,56	-0,52
	32,3			0,07	40,5			-0,42
	32,8			0,57	41,3			0,38
					41,5			0,58
Sem VSI B35 - m6	41,7	42,1	0,35	-0,37	43,2	44,0	0,71	-0,80
	42,1			0,03	43,8			-0,20
	42,4			0,33	44,1			0,10
					44,9			0,90
Sem VSI B45 - m6	52,5	53,1	0,56	-0,60	44,5	45,0	0,46	-0,52
	53,2			0,10	44,9			-0,13
	53,6			0,50	45,1			0,08
					45,6			0,58
C25 - m6	31,9	32,3	0,35	-0,37	35,6	36,1	0,40	-0,48
	32,3			0,03	35,9			-0,18
	32,6			0,33	36,3			0,22
					36,5			0,42
C35 - m6	42,2	42,5	0,35	-0,33	37,8	38,2	0,33	-0,38
	42,5			-0,03	38,1			-0,08
	42,9			0,37	38,2			0,02
					38,6			0,42
C45 - m6	51,1	51,7	0,60	-0,63	39,4	39,9	0,48	-0,52
	51,8			0,07	39,7			-0,22
	52,3			0,57	40,1			0,18
					40,5			0,58
G25 - m6	31,5	31,8	0,31	-0,33	33,1	34,2	0,77	-1,08
	31,9			0,07	34,2			0,02
	32,1			0,27	34,5			0,32
					34,9			0,72
G35 - m6	40,3	40,9	0,60	-0,57	36,1	36,9	0,61	-0,80
	40,8			-0,07	36,8			-0,10
	41,5			0,63	37,2			0,30
					37,5			0,60
G45 - m6	49,5	50,2	0,67	-0,73	37,7	38,2	0,38	-0,48
	50,4			0,17	38,1			-0,08
	50,8			0,57	38,3			0,12
					38,6			0,42

Tabela 3 – Resultados de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade do Concreto para os traços 1:7,5 (volume de pasta 16,5%)

Traço	Resistência (MPa)	Média	Desvio padrão	Diferença	Módulo (GPa)	Média	Desvio padrão	Diferença
D25 - m7,5	31,3	31,7	0,40	-0,43	45,3	45,9	0,51	-0,63
	31,8			0,07	45,8			-0,13
	32,1			0,37	46,1			0,18
					46,5			0,58
D35 - m7,5	43,1	43,6	0,50	-0,50	47,7	48,1	0,34	-0,35
	43,6			0,00	47,9			-0,15
	44,1			0,50	48,1			0,05
					48,5			0,45
D45 - m7,5	53,1	53,7	0,60	-0,60	50,1	50,7	0,49	-0,55
	53,7			0,00	50,4			-0,25
	54,3			0,60	50,9			0,25
					51,2			0,55
Intermediário D25 - m7,5	30,6	30,9	0,30	-0,30	43,4	43,9	0,64	-0,50
	30,9			0,00	43,5			-0,40
	31,2			0,30	43,9			0,00
					44,8			0,90
Intermediário D35 - m7,5	40,6	41,0	0,36	-0,40	45,6	46,2	0,53	-0,57
	41,1			0,10	45,9			-0,27
	41,3			0,30	46,4			0,23
					46,8			0,63
Intermediário D45 - m7,5	51,4	51,8	0,45	-0,43	47,9	48,5	0,43	-0,60
	51,8			-0,03	48,5			0,00
	52,3			0,47	48,7			0,20
					48,9			0,40
Sem VSI D25 - m7,5	30,6	30,8	0,25	-0,23	42,7	43,2	0,42	-0,45
	30,8			-0,03	42,9			-0,25
	31,1			0,27	43,4			0,25
					43,6			0,45
Sem VSI D35 - m7,5	40,1	40,5	0,40	-0,40	46,8	47,4	0,57	-0,63
	40,5			0,00	47,1			-0,32
	40,9			0,40	47,8			0,38

					48			0,58
Sem VSI D45 - m7,5	49,4	49,8	0,47	-0,37	48,2	48,6	0,41	-0,40
	49,6			-0,17	48,3			-0,30
	50,3			0,53	48,9			0,30
					49,0			0,40
B25 - m7,5	33,1	33,4	0,42	-0,33	44,2	44,7	0,42	-0,50
	33,3			-0,13	44,6			-0,10
	33,9			0,47	44,8			0,10
					45,2			0,50
B35 - m7,5	42,7	43,0	0,31	-0,33	45,8	46,2	0,40	-0,35
	43,1			0,07	45,9			-0,25
	43,3			0,27	46,2			0,05
					46,7			0,55
B45 - m7,5	54,3	54,7	0,40	-0,40	48,2	48,7	0,40	-0,47
	54,7			0,00	48,5			-0,17
	55,1			0,40	48,9			0,23
					49,1			0,43
Intermediário B25 - m7,5	32,1	32,8	0,65	-0,67	44,1	45,0	0,66	-0,85
	32,8			0,03	44,8			-0,15
	33,4			0,63	45,3			0,35
					45,6			0,65
Intermediário B35 - m7,5	41,6	41,9	0,31	-0,27	45,2	46,0	0,58	-0,75
	41,8			-0,07	45,8			-0,15
	42,2			0,33	46,3			0,35
					46,5			0,55
Intermediário B45 - m7,5	51,3	51,6	0,35	-0,33	47,2	48,0	0,68	-0,80
	51,6			-0,03	47,7			-0,30
	52			0,37	48,4			0,40
					48,7			0,70
Sem VSI B25 - m7,5	30,5	30,8	0,25	-0,27	42,1	43,1	0,72	-0,95
	30,8			0,03	42,9			-0,15
	31			0,23	43,5			0,45
					43,7			0,65
Sem VSI B35 - m7,5	39,5	39,9	0,40	-0,37	44,6	45,1	0,51	-0,52
	39,8			-0,07	44,8			-0,33
	40,3			0,43	45,4			0,27
					45,7			0,58
Sem VSI B45 - m7,5	49,8	50,2	0,35	-0,37	46,1	46,6	0,48	-0,52
	50,2			0,03	46,4			-0,23
	50,5			0,33	46,8			0,17
					47,2			0,58
C25 - m7,5	29,8	30,2	0,40	-0,40	36,6	37,1	0,39	-0,45
	30,2			0,00	36,9			-0,15
	30,6			0,40	37,2			0,15

					37,5			0,45
C35 - m7,5	38,9	39,5	0,65	-0,63	38,2	38,8	0,53	-0,63
	39,5			-0,03	38,6			-0,23
	40,2			0,67	39,1			0,27
					39,4			0,57
C45 - m7,5	48,2	48,8	0,66	-0,60	41,2	42,4	0,82	-1,15
	48,7			-0,10	42,4			0,05
	49,5			0,70	42,7			0,35
					43,1			0,75
G25 - m7,5	29,4	29,9	0,56	-0,50	36,4	37,0	0,50	-0,60
	29,8			-0,10	36,9			-0,10
	30,5			0,60	37,1			0,10
					37,6			0,60
G35 - m7,5	38,2	38,9	0,70	-0,67	39,2	39,9	0,56	-0,72
	38,8			-0,07	39,8			-0,13
	39,6			0,73	40,2			0,28
					40,5			0,58
G45 - m7,5	47,6	48,1	0,45	-0,47	40,9	41,6	0,58	-0,70
	48,1			0,03	41,5			-0,10
	48,5			0,43	41,7			0,10
					42,3			0,70

APÊNDICE B

Tabela 1 – 75% dos dados utilizados para a formulação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto

Volume de Pasta	Resistência à Compressão (f_{cj})	Forma do Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade da Rocha	Módulo Experimental
24,7	37,40	1,58	79,2	38,6
24,7	37,50	1,58	79,2	38,9
24,7	38,20	1,58	79,2	39,1
24,7	50,60	1,58	79,2	41,6
24,7	50,90	1,58	79,2	41,9
24,7	51,10	1,58	79,2	42,3
24,7	33,80	2,02	79,2	39,8
24,7	34,30	2,02	79,2	40,1
24,7	34,70	2,02	79,2	40,7
24,7	46,30	2,02	79,2	41,9
24,7	46,90	2,02	79,2	42,2
24,7	47,20	2,02	79,2	42,7
24,7	56,40	2,02	79,2	43,6
24,7	56,90	2,02	79,2	43,8
24,7	57,30	2,02	79,2	44,2
24,7	33,30	2,50	79,2	41,2
24,7	33,90	2,50	79,2	41,7
24,7	34,40	2,50	79,2	42,3
24,7	53,90	2,50	79,2	43,2
24,7	54,30	2,50	79,2	43,7
24,7	54,60	2,50	79,2	44,1
19,8	33,9	1,58	79,2	44,1
19,8	34,3	1,58	79,2	44,5
19,8	34,8	1,58	79,2	44,8
19,8	45,1	1,58	79,2	46,1
19,8	45,7	1,58	79,2	46,3
19,8	45,9	1,58	79,2	46,7
19,8	56,3	1,58	79,2	46,8
19,8	56,8	1,58	79,2	47,1
19,8	57,4	1,58	79,2	47,3
19,8	31,8	2,02	79,2	43,2
19,8	32,1	2,02	79,2	43,6
19,8	32,9	2,02	79,2	43,8
19,8	43,7	2,02	79,2	44,5
19,8	44,1	2,02	79,2	44,9

19,8	44,2	2,02	79,2	45,1
19,8	53,1	2,02	79,2	45,3
19,8	53,3	2,02	79,2	45,9
19,8	53,7	2,02	79,2	46,2
19,8	52,1	2,50	79,2	45,1
19,8	52,8	2,50	79,2	45,7
19,8	53,3	2,50	79,2	46,2
16,5	43,1	1,58	79,2	47,7
16,5	43,6	1,58	79,2	47,9
16,5	44,1	1,58	79,2	48,1
16,5	53,1	1,58	79,2	50,1
16,5	53,7	1,58	79,2	50,4
16,5	54,3	1,58	79,2	50,9
16,5	30,6	2,02	79,2	43,4
16,5	30,9	2,02	79,2	43,5
16,5	31,2	2,02	79,2	43,9
16,5	40,6	2,02	79,2	45,6
16,5	41,1	2,02	79,2	45,9
16,5	41,3	2,02	79,2	46,4
16,5	30,6	2,50	79,2	42,7
16,5	30,8	2,50	79,2	42,9
16,5	31,1	2,50	79,2	43,4
16,5	40,1	2,50	79,2	46,8
16,5	40,5	2,50	79,2	47,1
16,5	40,9	2,50	79,2	47,8
16,5	49,4	2,50	79,2	48,2
16,5	49,6	2,50	79,2	48,3
16,5	50,3	2,50	79,2	48,9
24,7	48,2	1,58	91,2	42,8
24,7	48,4	1,58	91,2	43,1
24,7	48,9	1,58	91,2	43,5
24,7	59,7	1,58	91,2	44,1
24,7	59,9	1,58	91,2	44,5
24,7	60,1	1,58	91,2	44,7
24,7	36,7	2,02	91,2	39,6
24,7	37,3	2,02	91,2	40,2
24,7	37,5	2,02	91,2	40,4
24,7	45,1	2,02	91,2	42,1
24,7	45,8	2,02	91,2	42,7
24,7	46,4	2,02	91,2	42,9
24,7	55,1	2,02	91,2	43,8
24,7	55,6	2,02	91,2	44,2
24,7	55,9	2,02	91,2	44,6

24,7	32,3	2,50	91,2	39,2
24,7	32,9	2,50	91,2	39,4
24,7	33,8	2,50	91,2	39,7
24,7	43,7	2,50	91,2	42,1
24,7	44,3	2,50	91,2	42,3
24,7	44,6	2,50	91,2	42,8
19,8	44,6	1,58	91,2	45,2
19,8	44,8	1,58	91,2	45,3
19,8	45,2	1,58	91,2	45,8
19,8	56,8	1,58	91,2	46,3
19,8	57,1	1,58	91,2	46,9
19,8	57,7	1,58	91,2	47,2
19,8	35,1	2,02	91,2	42,3
19,8	35,5	2,02	91,2	42,5
19,8	36,2	2,02	91,2	42,9
19,8	43,1	2,02	91,2	44,1
19,8	43,6	2,02	91,2	44,6
19,8	44,2	2,02	91,2	45,3
19,8	31,6	2,50	91,2	40,4
19,8	32,8	2,50	91,2	40,5
19,8	32,3	2,50	91,2	41,3
19,8	41,7	2,50	91,2	43,2
19,8	42,1	2,50	91,2	43,8
19,8	42,4	2,50	91,2	44,1
19,8	52,5	2,50	91,2	44,5
19,8	53,2	2,50	91,2	44,9
19,8	53,6	2,50	91,2	45,1
16,5	33,1	1,58	91,2	44,2
16,5	33,3	1,58	91,2	44,6
16,5	33,9	1,58	91,2	44,8
16,5	42,7	1,58	91,2	45,8
16,5	43,1	1,58	91,2	45,9
16,5	43,3	1,58	91,2	46,2
16,5	54,3	1,58	91,2	48,2
16,5	54,7	1,58	91,2	48,5
16,5	55,1	1,58	91,2	48,9
16,5	32,1	2,02	91,2	44,1
16,5	32,8	2,02	91,2	44,8
16,5	33,4	2,02	91,2	45,3
16,5	41,6	2,02	91,2	45,2
16,5	41,8	2,02	91,2	45,8
16,5	42,2	2,02	91,2	46,3
16,5	51,3	2,02	91,2	47,2

16,5	51,6	2,02	91,2	47,7
16,5	52	2,02	91,2	48,4
16,5	30,5	2,50	91,2	42,1
16,5	30,8	2,50	91,2	42,9
16,5	31	2,50	91,2	43,5
16,5	49,8	2,50	91,2	46,1
16,5	50,2	2,50	91,2	46,4
16,5	50,5	2,50	91,2	46,8
24,7	53,2	1,69	63,0	35,6
24,7	53,4	1,69	63,0	35,8
24,7	54,1	1,69	63,0	36,1
19,8	31,9	1,69	63,0	35,6
19,8	32,3	1,69	63,0	35,9
19,8	32,6	1,69	63,0	36,3
19,8	51,1	1,69	63,0	39,4
19,8	51,8	1,69	63,0	39,7
19,8	52,3	1,69	63,0	40,1
16,5	38,9	1,69	63,0	38,6
16,5	39,5	1,69	63,0	39,1
16,5	40,2	1,69	63,0	38,2
24,7	32,8	1,87	65,8	31,4
24,7	33,3	1,87	65,8	31,7
24,7	33,7	1,87	65,8	32,1
24,7	52,4	1,87	65,8	35,6
24,7	52,8	1,87	65,8	34,7
24,7	53,7	1,87	65,8	35,9
19,8	31,5	1,87	65,8	33,1
19,8	31,9	1,87	65,8	34,2
19,8	32,1	1,87	65,8	34,5
19,8	40,3	1,87	65,8	36,1
19,8	40,8	1,87	65,8	36,8
19,8	41,5	1,87	65,8	37,2
16,5	29,4	1,87	65,8	36,4
16,5	29,8	1,87	65,8	36,9
16,5	30,5	1,87	65,8	37,1
16,5	38,2	1,87	65,8	39,2
16,5	38,8	1,87	65,8	39,8
16,5	39,6	1,87	65,8	40,2
16,5	47,6	1,87	65,8	40,9
16,5	48,1	1,87	65,8	41,5
16,5	48,5	1,87	65,8	41,7

Tabela 2 – 25% dos dados utilizados para a validação do modelo de previsão do módulo de elasticidade do concreto para todos os modelos analisados, utilizando a média das repetições

Volume de Pasta	Resistência à Compressão (f_{cj})	Forma do Agregado Graúdo	Módulo de Elasticidade da Rocha	Módulo Experimental
16,5	51,8	2,02	79,2	48,4
16,5	31,8	1,58	79,2	45,8
24,7	45,1	1,69	63,0	34,5
19,8	42,5	1,69	63,0	38,1
24,7	59,2	1,58	79,2	42,9
19,8	35,6	1,58	91,2	42,1
19,8	42,8	2,50	79,2	44,3
16,5	48,7	1,69	63,0	42,4
19,8	53,3	2,02	91,2	46,2
19,8	31,9	2,50	79,2	42,3
24,7	53,7	2,50	91,2	42,7
19,8	50,4	1,87	65,8	38,1
24,7	34,2	1,69	63,0	32,3
24,7	38,1	1,58	91,2	39,8
16,5	39,8	2,50	91,2	44,8
24,7	42,9	1,87	65,8	33,4
16,5	30,2	1,69	63,0	36,9
24,7	45,1	2,50	79,2	42,7

Tabela 3 – Resultados observados e estimados para o módulo de elasticidade do concreto, utilizados para a validação dos modelos

Experim ntais	Modelo proposto	NBR 6118	ACI	FIB	EURO CODE	DAL MOLIN E MONTEIR O	BARBOS A	BILES KY	KUMM ER
48,4	46,4	45,2	34,8	45,0	45,8	31,2	42,5	31,7	34,5
45,8	42,2	33,7	26,0	38,5	39,7	26,0	31,7	23,1	30,1
34,5	36,3	31,3	32,1	32,3	33,0	29,7	39,2	29,3	33,2
38,1	38,7	30,2	31,0	31,7	32,4	29,0	37,9	28,2	32,7
42,9	42,9	48,7	37,5	47,0	47,6	32,7	45,8	34,0	35,7
42,1	43,6	36,2	27,8	39,9	41,0	27,2	34,0	25,0	31,1
44,3	42,6	40,4	31,1	42,3	43,3	29,1	38,0	28,3	32,8
42,4	42,1	32,7	33,5	33,1	33,7	30,5	41,0	30,6	33,9
46,2	47,4	45,9	35,3	45,5	46,2	31,5	43,2	32,2	34,8
42,3	40,3	33,8	26,0	38,5	39,8	26,1	31,8	23,2	30,1
42,7	44,6	46,1	35,5	45,6	46,3	31,6	43,4	32,4	34,8
38,1	41,1	37,1	34,2	37,2	37,8	30,9	41,8	31,2	34,3
32,3	34,0	35,3	27,2	29,5	30,4	26,8	33,2	24,4	30,8
39,8	41,2	37,7	29,0	40,8	41,9	27,9	35,5	26,2	31,7
44,8	46,7	38,7	29,8	41,4	42,4	28,3	36,4	27,0	32,1
33,4	36,5	33,7	31,1	35,3	36,1	29,1	38,1	28,4	32,8
36,9	38,2	24,5	25,1	28,4	29,4	25,5	30,7	22,3	29,7
42,7	40,1	41,7	32,1	43,1	44,0	29,7	39,2	29,3	33,2

Tabela 4 – Dados de Girardi (2018) utilizados para a validação do modelo previsto por este trabalho – Traço em massa 1:3

Agregado	Volume de Pasta (%)	f_{cj} (MPa)	Índice de Forma	E_c da Rocha (GPa)
Granito	40,1	48,4	1,8	94,7
Basalto	40,1	49,0	1,5	114,8
Diabásio	40,1	48,1	1,5	194,0

Fonte: Adaptado de Girardi, 2018

Tabela 5 – Dados de Girardi (2018) utilizados para a validação do modelo previsto por este trabalho – Traço em massa 1:5

Agregado	Volume de Pasta (%)	f_{cj} (MPa)	Índice de Forma	E_c da Rocha (GPa)
Granito	28,6	50,4	1,8	94,7
Basalto	28,6	53,1	1,5	114,8
Diabásio	28,6	50,6	1,5	194,0

Fonte: Adaptado de Girardi, 2018

Tabela 6 – Dados de Girardi (2018) utilizados para a validação do modelo previsto por este trabalho – Traço em massa 1:7

Agregado	Volume de Pasta (%)	f_{cj} (MPa)	Índice de Forma	E_c da Rocha (GPa)
Granito	22,3	46,9	1,8	94,7
Basalto	22,3	48,0	1,5	114,8
Diabásio	22,3	48,0	1,5	194,0

Fonte: Adaptado de Girardi, 2018