



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E  
DINÂMICO DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS BASÁLTICOS: ANÁLISE  
EXPERIMENTAL E PROPOSTA DE MODELO DE CORRELAÇÃO**

**WILLIAM DE ARAUJO THOMAZ**

**Foz do Iguaçu  
2020**



INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL (PPGECI)

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E  
DINÂMICO DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS BASÁLTICOS: ANÁLISE  
EXPERIMENTAL E PROPOSTA DE MODELO DE CORRELAÇÃO**

**WILLIAM DE ARAUJO THOMAZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edna Possan

Coorientador: Prof. Dr. Dan Yushin Miyaji

Foz do Iguaçu  
2020

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação  
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

T465

Thomaz, William de Araujo.

Contribuição ao estudo do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos contendo agregados basálticos: análise experimental e proposta de modelo de correlação / William de Araujo Thomaz. - Foz do Iguaçu - PR, 2020.

134 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu - PR, 2020.

Orientador: Edna Possan.

Coorientador: Dan Yushin Miyaji.

1. Módulo de Young. 2. Testes não-destrutivos. 3. Ondas ultrassônicas - testes. 4. Concreto - Testes. 5. Elasticidade - Concreto. 6. Agregados (Materiais de construção). I. Possan, Edna. II. Miyaji, Dan Yushin. III. Universidade Federal da Integração Latino Americana. IV. Título.

CDU 691.32:620.179(81)

WILLIAM DE ARAUJO THOMAZ

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E  
DINÂMICO DE CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS BASÁLTICOS: ANÁLISE  
EXPERIMENTAL E PROPOSTA DE MODELO DE CORRELAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Edna Possan  
UNILA

---

Coorientador: Prof. Dr. Dan Yushin Miyaji  
PTI

---

Prof. Dr. Cesar Winter de Mello  
UNILA

---

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita  
UFC

---

Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade  
PUC-RS

Foz do Iguaçu, 10 de setembro de 2020

*« Il faut bien que je supporte deux ou trois chenilles si je veux connaître les papillons. »*

**Antoine de Saint-Exupéry**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade concedida de poder estar nesta jornada terrena, me dando força e auxílio para enxergar o verdadeiro significado da existência e da necessidade contínua da progressão intelecto-moral.

Agradeço aos meus pais, Alfredo e Lucimara, e a minha irmã, Thaís, por estarem presentes na minha vida me apoiando em todas as minhas escolhas e mostrando o verdadeiro significado da palavra família e a importância dos valores universais.

Agradeço a Prof<sup>a</sup>. Edna e ao Prof. Dan que foram verdadeiros mestres na arte de orientação deste trabalho, contribuindo de forma exaustiva para que fosse possível atingir o objetivo da pesquisa. Ainda, agradeço a banca examinadora pelos comentários e críticas construtivas referente ao estudo realizado.

Agradeço ao Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA), em especial a Dalila, a Rafaela, a Sara e ao Eduardo que deram o suporte necessário para a realização das dosagens e da caracterização dos materiais. Ainda agradeço imensamente a Gabriela que esteve presente de maneira assídua me auxiliando na moldagem dos corpos de prova de concreto.

Agradeço ao Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCI), especialmente aos técnicos João Bernardino, Mauricio e Claudinei e ao engenheiro Fábio, que auxiliaram no desenvolvimento dos ensaios mecânicos das rochas e dos concretos. Agradeço, também, ao Centro de Estudo Avançados em Segurança de Barragens (CEASB) e ao departamento de geologia da UFSC, em especial a Débora e ao Arthur, pelo auxílio na realização da análise petrográfica das rochas.

Agradeço a Fundação Araucária e a UNILA pelo suporte financeiro para a aquisição de equipamentos para a pesquisa por meio do projeto FA 45190/2015, pela bolsa de estudos oferecido pelo Edital 10/2018-PRPPG e pelo apoio à ida ao evento científico na França por meio do Edital 73/2018-PRPPG. Ainda, agradeço a Votorantim pela doação do cimento e a CMIX Mineração e a DALBA Mineração pela doação dos agregados graúdos para a confecção dos corpos de prova de concreto.

Por fim, agradeço aos meus amigos do mestrado e a todos que de forma direta e indireta me auxiliaram para a obtenção do título de mestre para que eu pudesse percorrer o caminho acadêmico levando conhecimento e informação para aqueles que almejam.

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

## RESUMO

O módulo de elasticidade é uma das principais propriedades do concreto a qual está associada à deformação máxima permitida em projetos estruturais. O ensaio normatizado e mais difundido no Brasil é de caráter destrutivo, o qual demanda tempos elevados para a sua realização devido aos ciclos de carregamento necessários, além de um considerável número de corpos de prova. Como alternativa, ensaios não destrutivos, os quais geralmente são de rápida realização e demandam um número reduzido de amostras, vêm sendo estudados progressivamente durante os últimos anos como método para obtenção do valor do módulo de elasticidade dinâmico do material. Deste modo, este estudo avaliou comparativamente o método de ensaio destrutivo regido pela NBR 8522 (2017) e os métodos não destrutivos de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) e de Técnica de Excitação por Impulso (TEI) para a determinação do módulo de elasticidade do concreto. Para tal, foram produzidas diferentes misturas de concreto com três níveis de relação água/cimento (0,45, 0,55 e 0,65), agregado graúdo basáltico de três fontes mineralógicas diferentes do terceiro planalto paranaense (Foz do Iguaçu-PR, Toledo-PR e Guarapuava-PR) e quatro níveis de teor de agregado graúdo (60%, 54%, 48% e 42%). Os resultados indicaram que os valores do módulo dinâmico são 16% e 28% superiores ao estático para o TEI e VPU, respectivamente. A execução dos ensaios não destrutivos, para ambos os métodos, é cerca de 10 vezes mais rápida que para o ensaio destrutivo. Quanto aos modos de vibração longitudinal e flexional no método TEI, verificou-se uma divergência de aproximadamente 15 GPa nas idades iniciais do concreto. Aos 28 dias, os módulos de elasticidade dinâmico dos dois modos vibracionais são estatisticamente idênticos, contudo, é recomendado a utilização do modo longitudinal por este proporcionar menor desvio padrão. Com os resultados obtidos, obteve-se uma equação de correlação entre o módulo estático e o módulo dinâmico em função da massa específica do agregado graúdo, do teor de agregado no concreto e do método de medição utilizado, com o coeficiente de regressão do modelo matemático variando entre 0,811 e 0,901 e erro máximo de 2,46 GPa. A equação proposta é uma ferramenta em potencial para prever o módulo de elasticidade estático do concreto por meio de ensaios não destrutivos para as condições de contorno que orientaram seu desenvolvimento, podendo ser uma contribuição às normas técnicas brasileiras para determinação do módulo de elasticidade pelo método das frequências naturais de vibração e da velocidade de pulso ultrassônico.

**Palavras-chave:** Módulo de Young. Ensaios não-destrutivos. Velocidade de pulso ultrassônico. Técnica de excitação por impulso.

THOMAZ, William de Araujo. **Contribution to the study of the static and dynamic elastic modulus of concretes containing basaltic aggregates: Experimental analysis and proposed correlation model**. 2020. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

## ABSTRACT

The modulus of elasticity is one of the main properties of concrete which is associated with the maximum deformation allowed in structural projects. The standardized and most widespread test in Brazil is destructive, which demands high performance times due to the necessary loading cycles in addition to a considerable number of specimens. As an alternative, non-destructive tests, which are generally quick to perform and require a small number of samples, have been studied progressively over the past few years as a method to obtain the value of the material's dynamic elasticity modulus. Thus, this study comparatively evaluated the destructive test method governed by NBR 8522 (2017) and the non-destructive methods of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) and Impulse Excitation Technique (IET) to determine the elasticity modulus of the concrete. To this end, different concrete mixtures were produced with three levels of water/cement ratio (0.45, 0.55 and 0.65), coarse basaltic aggregate from three different mineralogical sources (Foz do Iguaçu-PR, Toledo-PR and Guarapuava-PR) and four levels of coarse aggregate content (60%, 54%, 48% and 42%). The results indicated that the values of the dynamic module are 16% and 28% higher than the static values for IET and UPV, respectively. The execution of non-destructive tests, for both methods, is 10 times faster than for the destructive test. As for the longitudinal and flexional vibration modes in the IET method, there was a divergence of approximately 15 GPa in the initial ages of the concrete. At 28 days, the dynamic modulus of the two vibrational modes are statistically identical, however, it is recommended to use the longitudinal mode as there is less standard deviation. With the results obtained, a correlation equation was obtained between the static and the dynamic modulus depending on the specific mass of the coarse aggregate, the aggregate content in the concrete and the measurement method used, with the regression coefficient of the mathematical model varying between 0.811 and 0.901 and a maximum error of 2.46 GPa. The proposed equation is a potential appliance for predicting the static modulus of concrete through non-destructive tests for the boundary conditions that guided its development, and can be a contribution to Brazilian technical standards for determining the modulus of elasticity using the method of natural vibration frequencies and ultrasonic pulse velocity.

**Keywords:** Young's modulus. Non-destructive testing. Ultrasonic pulse velocity. Impulse excitation technique.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comportamento típico de tensão-deformação no concreto .....	21
Figura 2 - Divisão dos planos de carga de um material não linear .....	22
Figura 3 - Ciclos de carregamento do concreto para determinação de $E_{ci}$ .....	23
Figura 4 - Compressômetro com dois relógios comparadores digitais .....	24
Figura 5 - Transdutor de deslocamento variável linear (LVDT).....	24
Figura 6 - Medidor elétrico do tipo <i>strain gage</i> .....	25
Figura 7 - Medidor elétrico do tipo <i>clip gage</i> .....	25
Figura 8 - Modos fundamentais de vibração para uma amostra cilíndrica.....	29
Figura 9 - Solicitação de esforços em um corpo de prova hipotético no ensaio de flexão.....	29
Figura 10 - Tipos de medição em um corpo de prova cilíndrico de concreto pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI): Longitudinal, Flexional e Torcional .....	30
Figura 11 - Fluxograma do procedimento metodológico para a Técnica de Excitação por Impulso .....	31
Figura 12 - Esquema de medição longitudinal em um corpo de prova de concreto cilíndrico pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI) .....	31
Figura 13 - Fluxograma do procedimento metodológico para a Velocidade de Pulso Ultrassônico .....	33
Figura 14 - Esquema de medição longitudinal em um corpo de prova de concreto cilíndrico pelo método de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) .....	33
Figura 15 - Parâmetros de influência do módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) do concreto .....	38
Figura 16 - Parâmetros de influência do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) do concreto .....	38
Figura 17 - Quadro dos parâmetros controláveis.....	44
Figura 18 - Resultado do ensaio de granulometria a laser para o cimento.....	46
Figura 19 - Curva granulométrica da areia conforme NBR 7211 (ABNT, 2009).....	47
Figura 20 - Locais da extração do agregado graúdo utilizado no estudo experimental .....	48
Figura 21 - Local de coleta do agregado graúdo da jazida de Guarapuava-PR .....	48

Figura 22 - Bloco de rocha sobre agregado graúdo de cada jazida do terceiro planalto paranaense.....	48
Figura 23 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.....	49
Figura 24 - Realização do ensaio de esmagamento.....	51
Figura 25 - Equipamento e ponteiros cônicos no ensaio de índice de carga pontual .....	52
Figura 26 - Análise das amostras das rochas após o ensaio de resistência à compressão puntiforme.....	53
Figura 27 - Amostras de rochas para a realização do ensaio de módulo de elasticidade .	54
Figura 28 - Excitação na amostra de rocha para determinação do módulo de elasticidade das rochas em estudo.....	54
Figura 29 - Corpos de prova no estado fresco.....	56
Figura 30 - Corpos de prova de concreto no estado endurecido .....	56
Figura 31 - Retificação do corpo de prova .....	58
Figura 32 - Medição do corpo de prova .....	58
Figura 33 - Equipamento e ensaio de resistência à compressão axial .....	58
Figura 34 - Suporte de amostra com os dispositivos de captação de som e pulsação para afeição do MED pela Técnica de Excitação por Impulso .....	60
Figura 35 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de Excitação por Impulso .....	60
Figura 36 - Equipamento Ultracon-170 para medição do $E_d$ pelo método de Velocidade de Pulso Ultrassônico .....	61
Figura 37 - Projeto de suporte para corpo de prova cilíndrico para efetuar a medição pelo método de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU): a) Vista frontal e b) Vista lateral .....	62
Figura 38 - Arranjo do corpo de prova de concreto no suporte para a medição do $E_{d,VPU}$ .	62
Figura 39 - Fotomicrografia de lâmina petrográfica: Foz do Iguaçu-PR .....	64
Figura 40 - Fotomicrografia de lâmina petrográfica: Toledo-PR.....	65
Figura 41 - Fotomicrografia de lâmina petrográfica: Guarapuava-PR .....	66
Figura 42 - Diagrama $SiO_2$ vs. $Na_2O+K_2O$ de Zanettin (1984) e Le Bas <i>et al.</i> (1986).....	67
Figura 43 - a) Diagrama binário $SiO_2$ vs. $K_2O$ de Middlemost (1975).....	68
Figura 44 - Resultados de resistência ao esmagamento ( $R$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ), compressão puntiforme ( $Is_{50}$ ) e resistência à compressão uniaxial ( $RCU$ ).....	69

Figura 45 - Relações entre os métodos de medição, teor de agregado graúdo, relação água/cimento e tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade estático e dinâmico	71
Figura 46 - Variação da quantidade de agregado graúdo ( $\beta$ ) utilizada em amostras de concreto contendo basalto de Toledo-PR	73
Figura 47 - Relação entre o módulo de elasticidade do concreto e a) o módulo de elasticidade do agregado; b) a resistência à compressão uniaxial; c) o índice de carga pontual; d) a resistência ao esmagamento	74
Figura 48 - Influência do tempo no módulo de elasticidade do concreto	75
Figura 49 - Estudo comparativo do modo de vibração longitudinal e flexional pelo método TEI	78
Figura 50 - Diferença de resultados de módulo de elasticidade dinâmico por meio do modo Longitudinal e Flexional nas idades iniciais	79
Figura 51 - Boxplot dos modos de vibração Longitudinal e Flexional para o TEI	80
Figura 52 - Boxplot dos resultados do programa experimental de todas as misturas de concreto para cada método de ensaio aos 28 dias	81
Figura 53 - Relação entre $E_{d,TEI}$ vs. $E_c$ e $E_{d,VPU}$ vs. $E_c$	83
Figura 54 - Gráfico de erros, em GPa, da equação de regressão não-linear	84
Figura 55 - Comparação de resultados de $E_c$ - $E_d$ com equações proposta por norma e literatura	84
Figura 56 - Valores dos coeficientes de correção para a equação de relação entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico	85
Figura 57 - Regressão linear a partir dos dados provenientes da equação proposta e do ensaio estático	86
Figura 58 - Gráfico de erros da equação proposta	87
Figura 59 - Influência do tipo de agregado, teor de argamassa e relação água/cimento na resistência à compressão do concreto	88
Figura 60 - Relação entre a resistência e a) o módulo de elasticidade do agregado; b) a resistência à compressão uniaxial; c) o índice de carga pontual; d) a resistência ao esmagamento	89
Figura 61 - Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão para concretos aos 28 dias	91
Figura 62 - Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão para concretos aos 28 dias	91
Figura 63 - Comparação de resultados de módulo em função da resistência com equações propostas por diferentes normas e autores	92

Figura 64 - Boxplot dos resultados utilizando a equação da NBR 6118 (ABNT, 2014).....	93
Figura 65 - Adequação do coeficiente para o basalto do terceiro planalto paranaense na NBR 6118 .....	94
Figura 66 - Gráfico de erros utilizando coeficiente 1,20 e 1,05 na equação da NBR 6118 (2014) .....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações normatizadas para estimar o módulo de elasticidade estático do concreto por meio da resistência à compressão.....	26
Tabela 2 - Equações da literatura para estimar o módulo de elasticidade do concreto por meio da resistência à compressão .....	27
Tabela 3 - Equações da literatura para estimar o módulo de elasticidade estático do concreto por meio do módulo de elasticidade dinâmico .....	34
Tabela 4 - Fatores de influência e seus efeitos no módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) do concreto .....	35
Tabela 5 - Fatores de influência e seus efeitos no módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) do concreto .....	37
Tabela 6 - Resumo das variáveis de estudos dos trabalhos analisados .....	39
Tabela 7 - Síntese de trabalhos experimentais dos últimos anos sobre módulo de elasticidade do concreto .....	40
Tabela 8 - Ensaio de caracterização do cimento, agregado miúdo e graúdo.....	45
Tabela 9 - Resultados de FRX para o cimento Portland .....	46
Tabela 10 - Síntese dos valores de caracterização da areia.....	47
Tabela 11 - Síntese dos valores de caracterização granulométrica, massa específica, massa unitária e absorção dos agregados graúdos .....	49
Tabela 12 - Guia de avaliação da qualidade do agregado graúdo.....	50
Tabela 13 - Classificação do Is50 .....	53
Tabela 14 - Amostra experimental teórica do projeto de pesquisa.....	55
Tabela 15 - Ensaio realizados para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos .....	57
Tabela 16 - Resultados de FRX .....	67

Tabela 17 - Resultados de resistência ao esmagamento, compressão puntiforme, estimativa da resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade.....	68
Tabela 18 - ANOVA - Influência do agregado graúdo, teor de argamassa e relação água/cimento no módulo de elasticidade do concreto .....	70
Tabela 19 - ANOVA – Variação do módulo de elasticidade no tempo .....	76
Tabela 20 - ANOVA – Módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 7 e 28 dias .....	76
Tabela 21 - Teste U de Mann-Whitney e Pearson – Relação entre o modo longitudinal e flexional no TEI .....	78
Tabela 22 - Média para cada relação de métodos de medição.....	81
Tabela 23 - Tempo médio de execução de cada ensaio de módulo de elasticidade para 3 corpos de prova de concreto .....	82
Tabela 24 - ANOVA – Resistência à compressão .....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIações

$E$	Módulo de Elasticidade
$E_c$	Módulo de Elasticidade Estático
$E_{ci}$	Módulo de Elasticidade Tangente Inicial
$E_{cs}$	Módulo de Deformação Secante
$E_d$	Módulo de Elasticidade Dinâmico
$E_{d,TEI}$	Módulo de Elasticidade Dinâmico - TEI
$E_{d,VPU}$	Módulo de Elasticidade Dinâmico - VPU
$E_f$	Módulo de Elasticidade à Flexão
$f_c$	Resistência à Compressão
$Is50$	Resistência à Compressão Puntiforme
$R$	Resistência ao Esmagamento
$RCU$	Resistência à Compressão Uniaxial
$\beta$	Teor de Agregado Graúdo
$\epsilon$	Deformação
$\sigma$	Tensão
$a/c$	Relação água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Braunauer, Emmet e Teller (Área Superficial Específica)
BS	British Standard
CAA	Concreto Auto Adensável

CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAR	Concreto de Alta Resistência
CC	Concreto Convencional
CC	Coeficiente de Curvatura
CL	Concreto Leve
CNU	Coeficiente de Não Uniformidade
CP	Corpo de Prova
CUAD	Concreto de Ultra Alto Desempenho
DRX	Difratometria de Raios X
FR	Frequência Ressonante
FRX	Fluorescência de Raios-X
GDL	Graus de Liberdade
GPa	Gigapascal
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO	International Organization for Standardization
LADEMA	Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais
LAMIR	Laboratório de Análise de Minerais e Rochas
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
LTCI	Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MPa	Megapascal
MQ	Média Quadrática
NBR	Norma Brasileira
PF	Perda ao Fogo
SANS	South African National Standard
SQ	Soma dos Quadrados
TEI	Técnica de Excitação por Impulso
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico
ZTI	Zona de Transição

$Al_2O_3$	Óxido de Alumínio
$CaO$	Óxido de Cálcio
$Fe_2O_3$	Óxido de Ferro
$FeO$	Óxido Ferroso
$K_2O$	Óxido de Potássio
$MgO$	Óxido de Magnésio
$Na_2O$	Óxido de Sódio
$P_2O_5$	Pentóxido de Fósforo
$SiO_2$	Dióxido de Silício
$SO_3$	Trióxido de Enxofre
$TiO_2$	Dióxido de Titânio

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1. OBJETIVO GERAL .....	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	19
<b>2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO .....</b>	<b>20</b>
2.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO.....	22
2.1.1. Instrumentos de Medição de Deformações.....	24
2.1.2. Determinação por Métodos Empíricos .....	26
2.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	28
2.2.1. Técnica de Excitação por Impulso.....	29
2.2.2. Velocidade de Pulso Ultrassônico .....	32
2.3. CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO .....	34
2.4. FATORES DE INFLUÊNCIA .....	35
<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>44</b>
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	45
3.1.1. Cimento .....	45
3.1.2. Agregado Miúdo.....	47
3.1.3. Agregado Graúdo .....	48
3.1.3.1. <i>Análise Petrográfica</i> .....	50
3.1.3.2. <i>FRX</i> .....	50
3.1.3.3. <i>Ensaio de Esmagamento</i> .....	51
3.1.3.4. <i>Índice de Carga Pontual</i> .....	52
3.1.3.5. <i>Módulo de Elasticidade</i> .....	53
3.2. DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS .....	55
3.3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO .....	57
3.3.1. Preparo dos Corpos de Prova .....	58
3.3.2. Resistência à Compressão.....	58
3.3.3. Módulo de Elasticidade Estático.....	59
3.3.4. Módulo de Elasticidade Dinâmico .....	59
3.3.4.1. <i>Técnica de Excitação por Impulso</i> .....	59
3.3.4.2. <i>Velocidade de Pulso Ultrassônico</i> .....	61
3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	63
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>64</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO .....	64
4.1.1. Análise Petrográfica.....	64
4.1.2. FRX.....	67
4.1.3. Ensaio de Esmagamento, Índice de Carga Pontual e Módulo de Elasticidade .....	68

4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO .....	70
4.2.1. Influência da Relação Água/Cimento .....	72
4.2.2. Influência do Teor e Tipo de Agregado Graúdo .....	72
4.2.3. Influência do Tempo.....	75
4.3. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DO CONCRETO .....	77
4.3.1. Comparação entre a Vibração Longitudinal e Flexional pelo Método da Técnica de Excitação por Impulso (TEI) .....	77
4.3.2. Relação entre os Módulos de Elasticidade Dinâmico (TEI e VPU) e o Estático.....	80
4.3.3. Análise de Regressão.....	82
4.4. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO .....	88
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>95</b>
5.1. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	97
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>98</b>



## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais de construção assegura o comportamento que estes irão obter quando sujeitos a cargas e sollicitação de esforços, seja elas externas ou devido ao peso próprio. O concreto, por exemplo, é amplamente demandado para a função estrutural, sobretudo quando combinado com aço, e tem como finalidade, na maioria das vezes, resistir as cargas atuantes, garantindo o desempenho e o tempo de vida útil das construções (ZHOU *et al.*, 2015). Contudo, com o passar do tempo, essas cargas atuantes e as condições ambientais influenciam na durabilidade do concreto, provocando deterioração na estrutura (LU e YUAN, 2012) (CHEN *et al.*, 2015). Por ser um material heterogêneo, o concreto não é um elemento perfeitamente elástico e suas deformações não são linearmente proporcionais às tensões aplicadas em todo regime de deformações reversíveis (MEHTA e MONTEIRO, 2013). Para que seja possível estimar essas tensões e deflexões nas estruturas, é necessário conhecer o módulo de elasticidade do material (NOGUCHI *et al.*, 2009).

Além de ser utilizado como parâmetro de projeto para atender as normas vigentes, o módulo de elasticidade é frequentemente utilizado como variável de dano para caracterizar o grau de deterioração do concreto sob ação de ataque de sulfato, congelamento-degelo, carbonatação e variações de temperatura e umidade, durante sua vida útil, em uma ampla gama de escalas, desde o nanômetro até o nível do metro (HONG *et al.*, 2012) (GAO *et al.*, 2013) (XIAO e NIU, 2015) (JIANG e NIU, 2016) (GUO *et al.*, 2019) (CHEN, ZOU, *et al.*, 2020).

O módulo de elasticidade do concreto pode ser classificado como estático ( $E_c$ ) ou dinâmico ( $E_d$ ), dependendo da metodologia de ensaio empregada para sua obtenção. O primeiro é obtido via ensaio mecânico, relacionando a tensão e a deformação de uma amostra no regime elástico. O primeiro é obtido via ensaio mecânico, relacionando a tensão e a deformação de uma amostra no regime elástico. Diversas normativas, como a NBR 8522 (ABNT, 2017), C469M-14 (ASTM, 2014), EN 12390-13 (BS, 2013) e ISO 1920-10 (OIS, 2010), limitam este regime à 30 ou 40% da tensão de ruptura à compressão do concreto. Obtém-se o módulo estático através da relação entre tensão e deformação obtidas em ciclos de carregamento e descarregamento na faixa de tensão que norteia o limite elástico (máximo de 40%). A leitura da deformação dá-se por meio de dispositivos mecânicos ou elétricos, como compressômetros com relógios comparadores,

transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) e extensômetros do tipo *strain gage* ou *clip gage*.

Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, sua determinação ocorre indiretamente por meio de ensaios não destrutivos (NEVILLE, 2016). Como o  $E_d$  é uma medida indireta, para seu cálculo, faz-se necessário utilizar correlações matemáticas específicas conforme o tipo de ensaio realizado (DILEK e LEMING, 2008) (WANG, GAO, *et al.*, 2015) (HONGYU *et al.*, 2015) (POKORNY, JENDZELOVSKY e KONECNA, 2016) (EL-NEWIHY *et al.*, 2018).

Dentre os métodos empregados pelos pesquisadores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, destaca-se a frequência ressonante (ALENGARAM, MAHMUD e JUMAAT, 2011) (ZHOU *et al.*, 2015) (EL-NEWIHY *et al.*, 2018), a técnica de excitação por impulso (LEE *et al.*, 2017) (JUROWSKI e GRZESZCZYK, 2018), e a velocidade de pulso ultrassônico (VPU) (BOGAS e GOMES, 2014) (RAMÍREZ, 2015) (MILICEVIĆ, ŠTIRMER e BJEGOVIĆ, 2016).

A frequência ressonante (FR) é baseada na vibração dos elementos para que seja determinada a frequência natural de vibração do elemento de estudo. Pode ser gerada por vibrações mecânicas variáveis ou por um impacto. As vibrações mecânicas são geradas por um vibrador acústico cuja frequência é continuamente variada (EL-NEWIHY *et al.*, 2018).

Da própria técnica de frequência ressonante surge a Técnica de Excitação por Impulso (TEI), que é baseada na resposta acústica da frequência de vibração natural de um material, após a excitação deste por um impacto manual ou automatizado (ALMEIDA, 2012) (BAHR *et al.*, 2013). Já a técnica de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), baseia-se na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de alta frequência através de um corpo de prova de dado material (BAHR *et al.*, 2013).

Por haver inúmeras vantagens (rapidez, baixo custo, repetição do ensaio no mesmo corpo de prova, entre outras), os ensaios para determinação do  $E_d$  já são bastante difundidos, sendo normatizados nos Estados Unidos (ASTM, 2015), Inglaterra (BSI, 2004) e Europa (EUROPEAN STANDARD, 2004). No Brasil, a norma para o ensaio de TEI está em elaboração no presente momento, com previsão de publicação em 2020<sup>1</sup>.

Contudo, em projetos de construção civil, é comumente utilizado como parâmetro, a base de cálculo, o valor do módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ), devido a este

---

<sup>1</sup> Concreto endurecido – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Projeto 018:300.002-005. ABNT/CB-018. 2019.

ser bem estabelecido desde o princípio do desenvolvimento do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2013), o valor do  $E_d$  é superior ao  $E_c$ , em torno de 20%, 30% e 40% para os concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente. Porém, nem sempre estes valores são tão simples de serem previstos, uma vez que a heterogeneidade do concreto pode influenciar nos dois módulos de forma desigual (NEVILLE, 2016). Dessa maneira, estudos variando os principais fatores de influência no módulo dinâmico e estático devem ser realizados, a fim de formular equações de correlação apropriadas. Com isso, fomenta-se a realização do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico para aplicações em projetos de estruturas de concreto.

Diante do exposto, o presente trabalho consistiu em avaliar comparativamente os módulos de elasticidade estático e dinâmico de concretos de diferentes misturas por meio de um estudo experimental. Com os resultados obtidos, foi proposta uma formulação matemática entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico a fim de contribuir com a elaboração da norma técnica brasileira para determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração e da velocidade de pulso ultrassônico.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar comparativamente o módulo de elasticidade estático e dinâmico de diferentes concretos empregando ensaio destrutivo e não destrutivo.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos têm-se:

- a) Avaliar a influência da relação água/cimento, teor e tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade de concretos determinado por meio de ensaios destrutivos e não destrutivos;
- b) Avaliar os métodos de medição não destrutivos: velocidade de pulso ultrassônico e técnica de excitação por impulso;

- c) Realizar um estudo comparativo entre o modo vibracional longitudinal e flexional da técnica de excitação por impulso;
- d) Propor uma equação de correlação entre o módulo estático e dinâmico referente às variáveis do projeto de experimento;
- e) Avaliar comparativamente a equação proposta para a estimativa do módulo de elasticidade dinâmico com as existentes na literatura;
- f) Comparar a equação proposta na NBR 6118 (2014) com os dados experimentais do presente estudo.

### 1.3. DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

Com relação às limitações da pesquisa, o estudo se restringiu a aferição do módulo de elasticidade dinâmico e estático, pelos métodos da Técnica de Excitação por Impulso (ASTM E-1876, 2015), Velocidade de Pulso Ultrassônico (ASTM C-597, 2016), e da Deformação Tangente Inicial (NBR 8522, 2017) de concretos moldados com agregados basálticos originados da região de Foz do Iguaçu-PR, Toledo-PR e Guarapuava-PR, com teor de agregado graúdo variando de 42% a 60% e relação água/cimento de 0,45, 0,55 e 0,65.

Como esta pesquisa objetiva-se avaliar comparativamente o valor do módulo de elasticidade estático e dinâmico dos concretos com as características mencionadas acima, os resultados não podem ser generalizados em relação a análise e interpretações de resultados qualitativos e quantitativos. Portanto, o modelo matemático proposto neste estudo deve ser aplicado somente em situações com as mesmas condições de contorno. Sugere-se, então, que pesquisas desta mesma natureza sejam realizadas em outras regiões de modo a analisar diferentes comportamentos dos resultados.

## 2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

O módulo de elasticidade do concreto ( $E$ ), também conhecido como módulo de Young<sup>2</sup>, é um importante parâmetro mecânico que reflete a capacidade do material de se deformar elasticamente após aplicada uma tensão (JUROWSKI e GRZESZCZYK, 2015) (BEUSHAUSEN e DITTMER, 2015) (ZHOU *et al.*, 2018) (ESTOLANO *et al.*, 2018). Outra forma de interpretá-lo, dada a sua unidade (pressão), é de uma resistência oferecida pelo material a deformação no regime elástico. Sua definição origina-se da Lei de Hooke (Equação 1), no qual diz respeito sobre a proporcionalidade entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\varepsilon$ ) de um material.

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

Segundo Neville (2016), quando os dois componentes elementares do concreto, agregado e a pasta de cimento hidratada, são submetidos a uma carga axial separadamente, eles exibem uma relação tensão-deformação considerada linear<sup>3</sup>. Já o concreto, quando tensionado, exibe um comportamento não totalmente linear. À medida que o material é submetido a uma tensão, é exibida uma curvatura no gráfico tensão-deformação. Essa não linearidade é ocasionada por mudanças microestruturais no concreto, como o desenvolvimento de microfissuras na zona de transição (HSU *et al.*, 1963) (MEHTA e MONTEIRO, 2013).

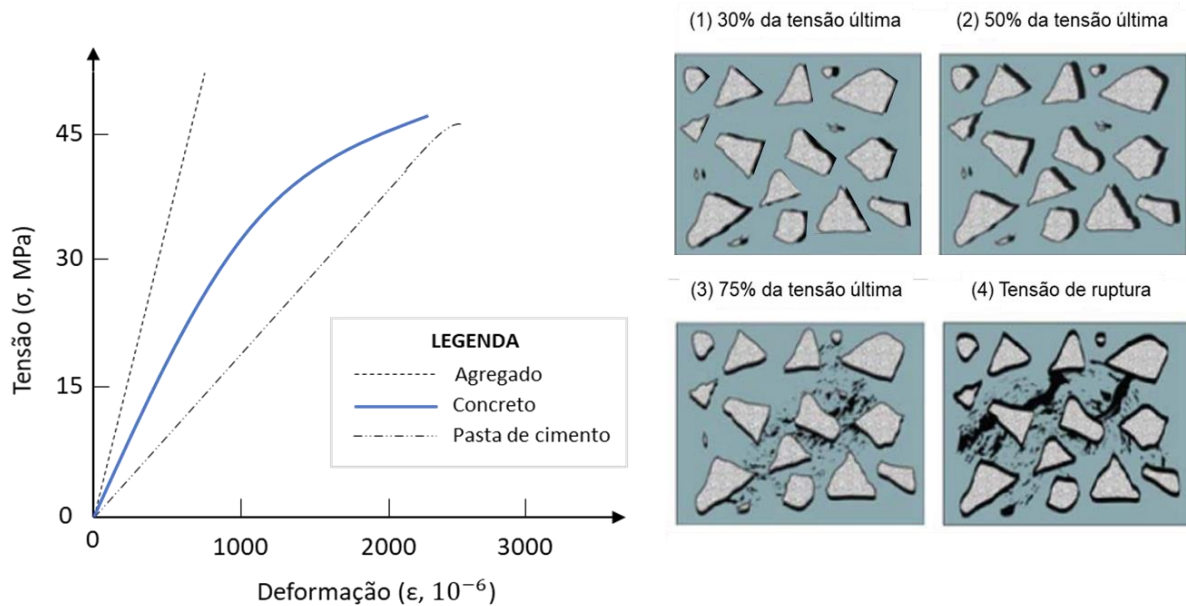
A zona de transição (ZTI) é a interface porosa entre a matriz da pasta de cimento e o agregado graúdo resultante da alta concentração de água da hidratação do cimento (GRONDIN e MATALLAH, 2014) (ESCADEILLAS e MASO, 1991) (OLLIVIER, MASO e BOURDETTE, 1995). A sua espessura varia entre 20  $\mu\text{m}$  e 50  $\mu\text{m}$  e alguns estudos experimentais demonstraram que o valor da espessura e as propriedades da ZTI podem depender do tamanho agregado (ELSHARIEF, COHEN e OLEK, 2003) e de sua composição mineralógica (TASONG, LYNSDALE e CRIPPS, 1999).

---

<sup>2</sup> O conceito de módulo de elasticidade foi estabelecido, em 1802, pelo pesquisador inglês Thomas Young, no qual relaciona o comprimento de um objeto à tensão aplicada sobre o mesmo.

<sup>3</sup> Embora na literatura seja difundida a linearidade da pasta de cimento quanto a relação tensão-deformação, algumas constatações sobre a não-linearidade também já foram realizadas por Attiogbe e Darwin em 1987 (NEVILLE, 2016).

Na Figura 1 é demonstrado o comportamento do concreto e dos seus constituintes no gráfico tensão-deformação e a microfissuração na zona de transição em função do valor da tensão aplicada.



**Figura 1 - Comportamento típico de tensão-deformação no concreto**

**Fonte: Adaptado de Neville (2016) e Mehta e Monteiro (2013)**

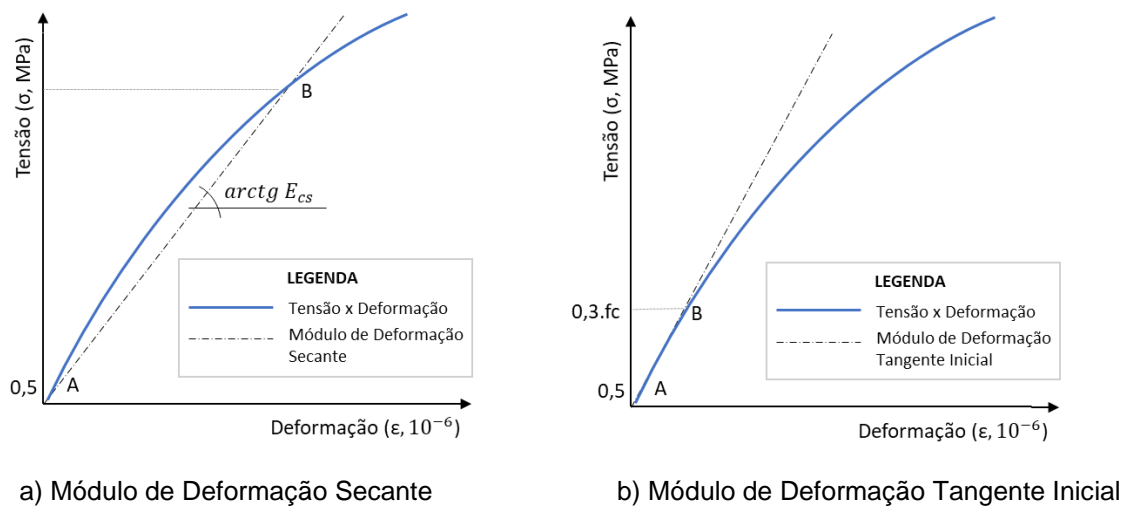
À medida que a tensão aumenta acima de 30% a 50% da tensão última, as microfissuras da zona de transição começam a aumentar, tanto em quantidade quanto em dimensão, e a linearidade começa a se modificar. Já entre 50% e 75% da tensão última, há a proliferação de fissuras na matriz e a ZTI começa a se tornar instável, fazendo com que a curva do gráfico tensão-deformação se curve consideravelmente em direção à horizontal (NEVILLE, 2016). Acima de 75% da tensão última, há a instabilidade do conjunto e uma rápida propagação de fissuras na matriz e na zona de transição em consequência da tensão crescente. Essas fissuras causam uma redução na área efetiva do concreto que resiste à carga aplicada (OLLIVIER, MASO e BOURDETTE, 1995).

Para o concreto, há três categorias de módulo de elasticidade em função da forma ou ensaio de determinação o Módulo de Elasticidade Estático ( $E_c$ ), o Módulo de Elasticidade Dinâmico ( $E_d$ ) e o Módulo de Elasticidade à Flexão ( $E_f$ )<sup>4</sup>, as quais serão discutidas na sequência.

<sup>4</sup> O  $E_f$  é utilizado para projetos e análise de pavimentos e sua determinação ocorrer a partir do ensaio de flexão em uma viga carregada. Como este ensaio não é de interesse neste estudo, o presente trabalho dará ênfase somente no  $E_c$  e no  $E_d$ .

## 2.1. MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

O Módulo de Elasticidade Estático ( $E_c$ ) é determinado por meio de uma velocidade de carregamento e tensão previamente estabelecida no regime elástico do material (ISO, 2010) (ASTM, 2014) (MEHTA e MONTEIRO, 2013) (NEVILLE, 2016). No Brasil, a norma NBR 8522 (ABNT, 2017) descreve dois tipos de carregamento possíveis para determinar o  $E_c$  do concreto (Figura 2): o *Módulo de Deformação Secante* ( $E_{cs}$ ) e o *Módulo de Deformação Tangente Inicial*<sup>5</sup> ( $E_{ci}$ ).



**Figura 2 - Divisão dos planos de carga de um material não linear**  
**Fonte: Autor (2020)**

O primeiro, cujo valor numérico é o coeficiente angular da reta secante ao diagrama tensão-deformação, corresponde entre a tensão ( $\sigma_a$ ) de 0,5 MPa e à tensão considerada pelo usuário, usualmente compreendida acima de 40% da resistência do concreto. Ele é frequentemente utilizado para a avaliação do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal (ABNT, 2014).

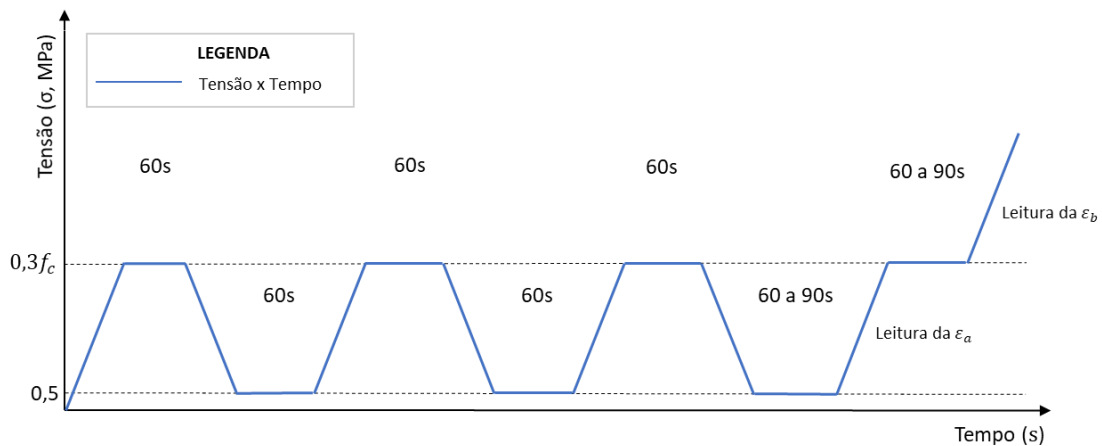
Já o segundo é considerado equivalente ao módulo de deformação secante, ou cordal<sup>6</sup>, entre 0,5 MPa e 30% do valor obtido da resistência do concreto ( $f_c$ ) e, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), seu uso é recomendado para cálculos de perdas de protensão. Como é necessário verificar o nível de carregamento a ser aplicado neste modo

<sup>5</sup> Comumente conhecido pelos engenheiros e projetistas somente como *Módulo de Elasticidade*.

<sup>6</sup> Módulo de Elasticidade Cordal: dado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão-deformação.

de ensaio, a norma NBR 8522 (ABNT, 2017) estabelece que, dos cinco corpos de prova<sup>7</sup> necessários para o ensaio, dois sejam pertinentes à averiguação da média da resistência à compressão conforme recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018).

O ensaio consiste na aplicação<sup>8</sup> da tensão, previamente escolhida ou calculada, durante 60 segundos no corpo de prova. Em seguida, a tensão é reduzida para 0,5 MPa e, a partir disso, mais dois pré-ciclos de carga são realizados, conforme demonstrado na Figura 3.



**Figura 3 - Ciclos de carregamento do concreto para determinação de  $E_{ci}$**   
**Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2017)**

Após o último ciclo de pré-carga, as deformações no corpo de prova de concreto são verificadas por meio de instrumentos<sup>9</sup> mecânicos ou elétricos que são instalados no centro do corpo de prova antes do início do ensaio. Por fim, após as aferições da deformação, é realizado o rompimento do corpo de prova.

Caso seja determinado o  $E_{ci}$ , é necessário verificar se a resistência à compressão do corpo de prova não diverge 20% da média das resistências calculadas anteriormente. Na condição do resultado não estar contido neste intervalo, os resultados obtidos no ensaio devem ser descartados.

<sup>7</sup> Segundo a NBR 8522 (2017), os corpos de prova devem ser cilíndricos, respeitando a proporção  $\frac{h}{d} = 2$ . Para corpos de prova moldados, o diâmetro deve ser no mínimo quatro vezes o tamanho máximo nominal do agregado graúdo utilizado e a determinação do diâmetro e da altura das amostras devem ser aferidas com 0,1 mm de precisão.

<sup>8</sup> Para o carregamento e descarregamento, a norma impõe uma velocidade de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s e deve ser constante durante todo o ensaio. Essa recomendação é necessária pois a velocidade de aplicação da carga pode influenciar no resultado do módulo de elasticidade.

<sup>9</sup> A NBR 8522 (2017) estabelece que, para a realização do ensaio, não deve haver interferências do operador nos instrumentos de medição de deformação e estes devem ter resolução de  $\pm 1 \times 10^{-3}$  mm e erro relativo máximo inferior a 1%.



No caso do Módulo de Elasticidade Tangente Inicial, após realizada a medição da deformação do corpo de prova, o valor é calculado conforme a equação recomendada pela NBR 8522 (ABNT, 2017):

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{(\sigma_b - 0,5)}{(\varepsilon_b - \varepsilon_a)} \cdot 10^{-3} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde  $\sigma_b$  é 30% da resistência média dos corpos de prova, em MPa,  $\varepsilon_b$  é a deformação específica média sob a tensão  $\sigma_b$ , e  $\varepsilon_a$  é a deformação específica média dos corpos de prova sob tensão de 0,5 MPa.

### 2.1.1. Instrumentos de Medição de Deformações

Para a medição da deformação do concreto são empregados instrumentos de medição de deformação mecânicos ou elétricos. Segundo Montija (2007) os instrumentos mais utilizados na determinação do  $E_c$  são os compressômetros com relógios comparadores (Figura 4), transdutor de deslocamento variável linear (LVDT, do inglês *Linear Variable Differential Transformer*) (Figura 5) e extensômetros elétricos do tipo *strain gage* (Figura 6) ou *clip gage* (Figura 7).



**Figura 4 - Compressômetro com dois relógios comparadores digitais**  
Fonte: Bezerra (2007)



**Figura 5 - Transdutor de deslocamento variável linear (LVDT)**  
Fonte: Araújo, Guimarães e Geyer (2015)



**Figura 6 - Medidor elétrico do tipo *strain gage***

**Fonte: Controls Group (2019)**



**Figura 7 - Medidor elétrico do tipo *clip gage***

**Fonte: Autor (2020)**

O compressômetro é o aparato onde é alocado o dispositivo para efetuar a medição da deformação transversal das amostras de concreto quando é tensionado longitudinalmente. A medição da deformação se realiza por meio um pino apalpador e o resultado é mostrado em relógios comparadores, que podem ser manuais ou digitais. O LVDT também pode ser acoplado no compressômetro e seu mecanismo de funcionamento ocorre por meio de forças eletromotrizes induzidas entre suas três bobinas. A referência da medição ocorre quando a tensão de saída, quando aplicada a corrente, se anula (MONTIJA, 2007).

Já os transdutores elétricos do tipo *strain gages* (utilizado por meio de colagem superficial, embutidos internamente ou fixados externamente) são formados por filamentos metálicos e a medição ocorre com a variação da resistência elétrica. A diferença de potencial, entre as extremidades da ponta, é alterada com a deformação do corpo de prova por causa da mudança de resistência do conjunto condutor. Quando o *strain gages* estão isolados em caixas e acoplados à ancoragem, eles são denominados *clip gage* e estudos demonstram que os resultados de dispersão do método de ensaio são menores se comparado com outros métodos de medição (ALMEIDA, 2004).

### 2.1.2. Determinação por Métodos Empíricos

Nem sempre a determinação experimental do módulo de elasticidade estático do concreto é possível de ser conduzida. Diante disso, formulações empíricas têm sido sugeridas por normatizações e na literatura no decorrer dos anos para estimar o módulo em função da resistência e, em alguns casos, também em função do tipo de agregado utilizado.

Embora existam vários modelos matemáticos, na maioria dos casos, as equações formuladas seguem o mesmo princípio:  $\alpha \cdot f_c^\beta$ , sendo  $\alpha$  um coeficiente numérico,  $f_c$  a resistência à compressão do concreto e  $\beta$  um coeficiente numérico equivalente a  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{1}{3}$ , conforme demonstrado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Equações normatizadas para estimar o módulo de elasticidade estático do concreto por meio da resistência à compressão**

Norma	Expressão	Observação	Equação
ACI 318 (2014)	$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c}$	-	(3)
ACI 363R (2010)	$E_c = 3320 \cdot \sqrt{f_c} + 6900$	Concreto de Alta Resistência	(4)
CEB-FIP (1993)	$E_c = 21500 \cdot \alpha_e \cdot \left(\frac{f_c + 8}{10}\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)}$	$30 \leq f_c \leq 60 \text{ MPa}$	(5)
CSA (2014)	$E_c = 4500 \cdot \sqrt{f_c}$	-	(6)
	$E_c = (3300\sqrt{f_c} + 6900) \cdot \left(\frac{w}{2300}\right)^{1,5}$	Concreto de Alta Resistência	(7)
EUROCODE 2 (2004)	$E_c = 9500 \cdot (f_c + 8)^{0,33}$	-	(8)
NBR 6118 (2014)	$E_c = \alpha_e \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_c}$	$20 \leq f_c \leq 50 \text{ MPa}$	(9)
	$E_c = 21500 \cdot \alpha_e \cdot \left(\frac{f_c}{10} + 1,25\right)^{\left(\frac{1}{3}\right)}$	$55 \leq f_c \leq 90 \text{ MPa}$	(10)
NS 3473 (1992)	$E_c = 9500 \cdot f_c^{0,3} \cdot \left(\frac{w}{2400}\right)^{1,5}$	-	(11)
TS500 (2005)	$E_{c28} = 3250\sqrt{f_{c28}} + 1400$	-	(12)
KCI (2007)	$E_c = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_c + 8}$	-	(13)
OBS:		$E_c$ ou $E_{c28}$ : módulo de elasticidade do concreto	
$f_c$ : resistência à compressão cilíndrica do concreto		$w$ : peso unitário do concreto	
$f_{c28}$ : resistência à compressão do 28º dia		$\alpha_e$ : coeficiente referente ao tipo de agregado	

Fonte: Autor (2020)

A fim de obter resultados com menores erros para um grupo específico de concretos por conta da variabilidade de materiais disponíveis regionalmente, vários pesquisadores realizaram estudos experimentais e formularam suas próprias equações, conforme demonstrado na Tabela 2.

**Tabela 2 - Equações da literatura para estimar o módulo de elasticidade do concreto por meio da resistência à compressão**

Autores	Expressão	Observação	Equação
(RASHID, MANSUR e PARAMASIVAM, 2002)	$E_c = 8,9 \cdot (f_c)^{0,33}$	$20 < f_c < 130 \text{ MPa}$	(14)
(THOMAS e RAMASWAMY, 2007)	$E_c = 4200 \cdot \sqrt{f_c}$	$30 < f_c < 75 \text{ MPa}$	(15)
(IRAVANI, 1996)	$E_c = 3800 \cdot \sqrt{f_c}$	$55 < f_c < 125 \text{ MPa}$	(16)
(AHMAD e SHAH, 1985)	$E_c = 8,8 \cdot (f_c)^{0,325}$	$f_c \cong 84 \text{ MPa}$	(17)
(GRAYBEAL, 2012)	$E_c = 4069 \cdot \sqrt{f_c}$	$97 < f_c < 179 \text{ MPa}$	(18)
(GRAYBEAL, 2007)	$E_c = 3840 \cdot \sqrt{f_c}$	$126 < f_c < 193 \text{ MPa}$	(19)
(MA e SCHNEIDER, 2002)	$E_c = 16,365 \cdot \ln(f_c) - 34,828$	$f_c \geq 140 \text{ MPa}$	(20)
(SRITHARAN, BRISTOW e PERRY, 2003)	$E_c = 4,150 \cdot \sqrt{f_c}$	Alta Resistência	(21)
(MENSUR, WEE e CHERAN, 1999)	$E_c = 4050 \cdot \sqrt{f_c}$	Agregado de RCD	(22)
(RASHID, HOSSAIN e ISLAM, 2008)	$E_c = 5324 \cdot \sqrt{f_c} - 1218$	Agregado de RCD	(23)
(MILICEVIĆ, ŠTIRMER e BJEGOVIĆ, 2016)	$E_c = 4735,7 \cdot f_c^{0,4255}$	Agregado de RCD	(24)

OBS:  
 $f_c$ : Resistência à compressão cilíndrica do concreto  
 $E_c$ : Módulo de elasticidade estático do concreto

**Fonte: Autor (2020)**

Como algumas equações da Tabela 3 são obtidas de experimentos realizados em um número restrito de amostras de concreto e as propriedades mecânicas do material são concernentes aos tipos e proporções de ligantes e agregados, as equações podem não satisfazer todos os dados experimentais. Dessa maneira, autores como Noguchi *et al.* (2009), Duan, Kou e Poon (2013) e Lye, Dhir e Ghataora (2016) utilizaram banco de dados experimentais publicados por diversos autores em revistas científicas internacionais para permitir uma visão geral do desempenho do módulo de elasticidade do concreto em função dos fatores de influência.

## 2.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

Diferente do módulo de elasticidade estático, que está condicionado à aplicação de uma tensão conhecida no concreto, o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) é determinado por uma tensão desprezível, ou seja, não há aplicação de carga e, conseqüentemente, não há microfissuração no concreto (NEVILLE, 2016).

Mehta e Monteiro (2013) relatam que, como o módulo de elasticidade dinâmico está relacionado a uma deformação instantânea muito pequena, ele pode ser considerado aproximadamente igual ao *Módulo de Deformação Tangente Inicial* e sensivelmente maior que o *Módulo de Deformação Secante*.

Para a obtenção do  $E_d$ , empregam-se métodos de medição indireta, como, por exemplo, o Método da Frequência Ressonante (DILEK e LEMING, 2008), Método da Teoria de Termoflutuação (SHKOLNIK, 2008), Método de Excitação Transiente (WANG *et al.*, 2015), Método Elétrico (HONGYU *et al.*, 2015), Método da Auto Frequência de Elementos Não-Fraturados (MUSIAŁ e GROSEL, 2016), Método da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) e Método da Técnica de Excitação por Impulso (TEI).

Recentemente, estes dois últimos métodos têm sido amplamente utilizando entre os pesquisadores para a realização de estudos sobre o módulo de elasticidade dinâmico (POPOVICS, 2008) (LIZARAZO-MARRIAGA e YÉPEZ, 2011) (KOCÁB *et al.*, 2013) (BAHR *et al.*, 2013) (BOGAS e GOMES, 2014) (OTANI e PEREIRA, 2015) (MILICEVIĆ, ŠTIRMER e BJEGOVIĆ, 2016) (LEE *et al.*, 2017) (ESTOLANO *et al.*, 2018).

No Brasil ainda não existe uma norma específica para determinar o módulo de elasticidade dinâmico do concreto, tanto para a Técnica de Excitação por Impulso quanto para a Velocidade de Pulso Ultrassônico<sup>10</sup>. Contudo, é possível utilizar normas internacionais, como a ASTM E-1876 (2015), que fornecem recomendações para estimar o módulo de elasticidade dinâmico utilizando a técnica de excitação do corpo de prova por impulso e a ASTM C-597 (2016) a qual utiliza velocidade de propagação de ondas longitudinais obtidas por pulsos ultrassônicos. Tendo em vista a utilização destas duas técnicas nesta pesquisa, estas serão apresentadas em detalhe na sequência.

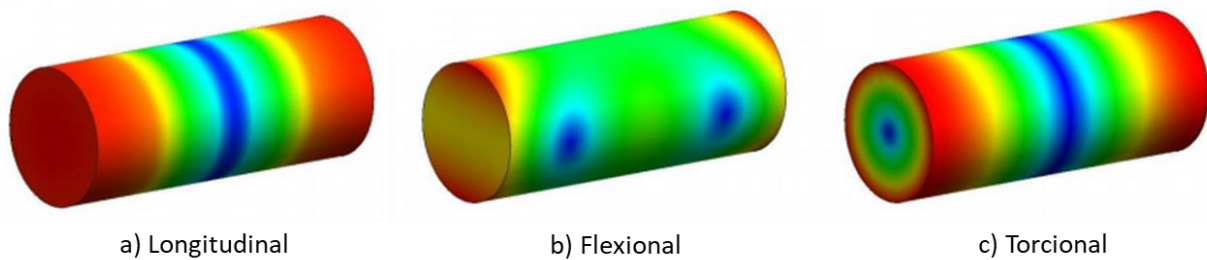
---

<sup>10</sup> No Brasil, a NBR 8802 estabelece somente o método de ensaio não destrutivo para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais em concretos obtidas por pulsos ultrassônicos, e não o módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

### 2.2.1. Técnica de Excitação por Impulso

O método da Técnica de Excitação por Impulso (TEI) baseia-se, fundamentalmente, na determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto a partir das frequências naturais de vibração. O ensaio consiste em excitar um corpo de prova de geometria regular conhecida (cilíndrica, prismática, placas, etc.) com um leve impulso manual ou mecânico de curta duração de maneira longitudinal, flexional ou torcional, a fim de obter a frequência e atenuação da resposta acústica captada por um acelerômetro (BAHR *et al.*, 2013).

Com a excitação, o corpo de prova vibra e para cada modo empregado há uma frequência fundamental característica. Na Figura 8 são apresentadas os modos de vibração para um corpo de prova cilíndrico para os três tipos de excitação citados.



**Figura 8 - Modos fundamentais de vibração para uma amostra cilíndrica**  
**Fonte: Pereira e Otani (2017)**

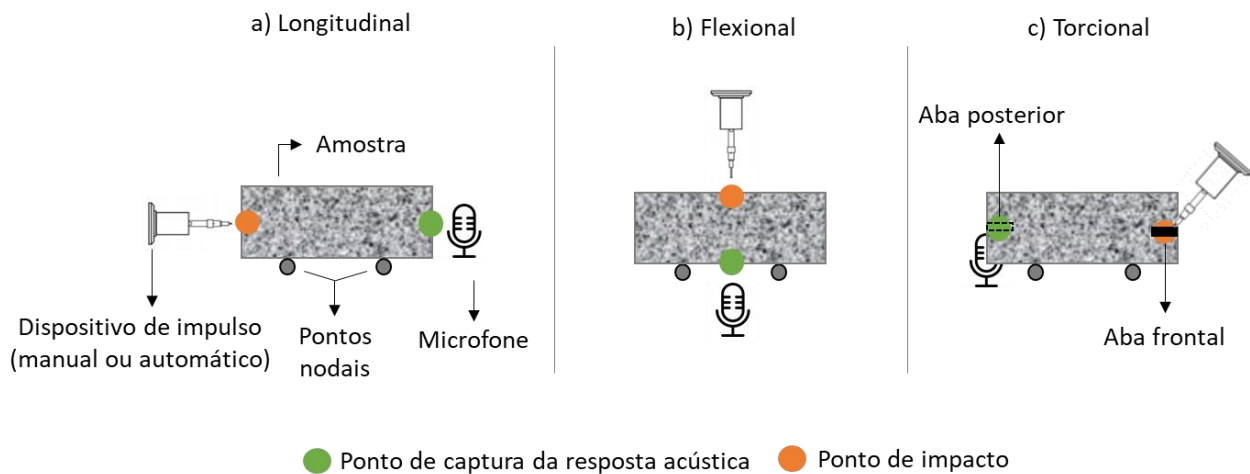
As regiões em coloração azul refletem os pontos no qual a amplitude de vibração é mínima, ao passo que as regiões de coloração avermelhado representam a amplitude de vibração máxima (Figura 9) (CALLISTER, 2007).



**Figura 9 - Solicitação de esforços em um corpo de prova hipotético no ensaio de flexão**  
**Fonte: Pereira e Otani (2017)**

Porém, como na superfície onde ocorre o ensaio de flexão é a região em que estão presentes os maiores valores de tensão, caso a rigidez do corpo de prova seja diferente na superfície em comparação ao centro (por causa de poros, fissuras, etc.), haverá uma discrepância nos valores obtidos pelo modo de vibração flexional e longitudinal.

Na Figura 10 estão representadas as condições de contorno ótimas para se obter as frequências naturais de vibração dos principais modos de vibração de um corpo de prova cilíndrico.



**Figura 10 - Tipos de medição em um corpo de prova cilíndrico de concreto pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI): Longitudinal, Flexional e Torcional**

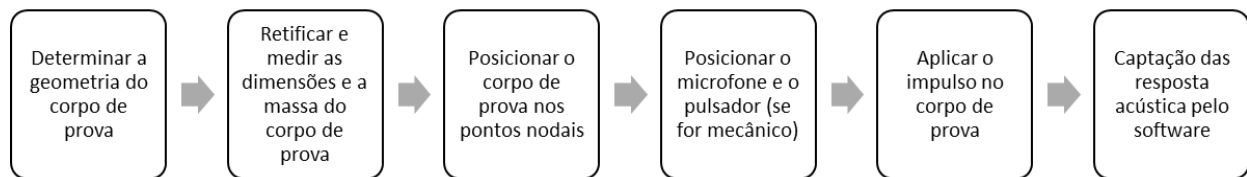
Fonte: Autor (2020)

Segundo Callister (2007), quando o corpo de prova é excitado na direção longitudinal, o módulo de elasticidade medido é referente à direção do comprimento do corpo de prova (Figura 10-a), ou seja, este módulo é equivalente ao ensaio obtido com aplicação de carga axial ou de tração. Quando a vibração ocorre de maneira flexional (Figura 10-b), as solicitações que ocorrem são simultaneamente de tração e compressão na amostra. Quanto ao módulo torcional (Figura 10-c), a metodologia utilizada é a mesma do ensaio estático de torção, contudo, é necessário acoplar pequenas abas próximo às extremidades do corpo de prova para auxiliar na excitação e na captação da resposta acústica. Este último ensaio, por depender da inclusão dessas abas, se torna mais demorado de se realizar.

Segundo a norma ASTM E-1876 (2015), para realizar a medição do módulo de elasticidade dinâmico por meio da Técnica de Excitação por Impulso, após a pesagem e medição da amostra, o corpo de prova de concreto deve ser posicionado sobre um

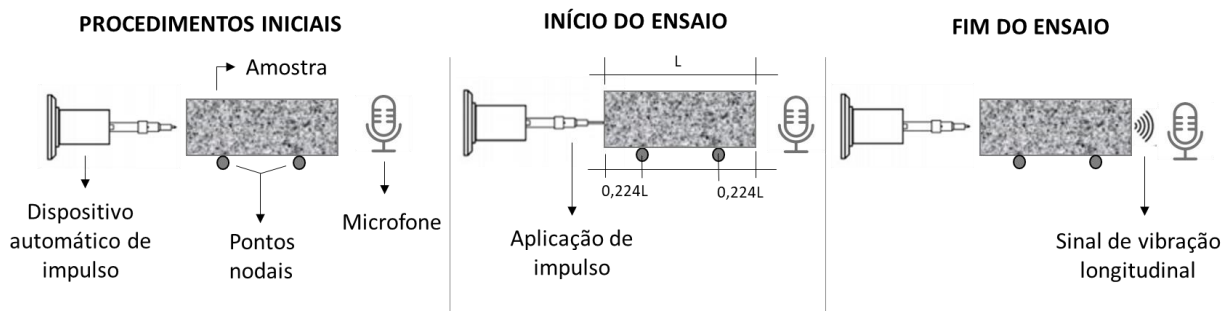
suporte nos pontos nodais ( $0,224 \cdot L$  de cada extremidade, sendo  $L$  o comprimento do corpo de prova). O pulsador e o captador acústico devem estar alocados nos pontos referentes ao tipo de medição do estudo (longitudinal, flexional ou torcional), e em seguida é aplicada uma leve batida na amostra para que seja captada as frequências de vibração.

Na Figura 11 é mostrado um fluxograma do procedimento metodológico do ensaio e na Figura 12 é mostrado o ensaio em um corpo de prova cilíndrico de concreto com medição longitudinal.



**Figura 11 - Fluxograma do procedimento metodológico para a Técnica de Excitação por Impulso**

Fonte: Autor (2020)



**Figura 12 - Esquema de medição longitudinal em um corpo de prova de concreto cilíndrico pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI)**

Fonte: Autor (2020)

Os dados discretos são processados por um software que realiza a transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) levando o problema do domínio do tempo para o da frequência (JUROWSKI e GRZESZCZYK, 2018). Em síntese, a hipótese se respalda na vertente em que a frequência natural de vibração de um determinado corpo de prova de concreto está intimamente relacionada ao módulo de elasticidade dinâmico do material (COSSOLINO e PEREIRA, 2010).

Nas Equações 25, 26 e 27 é demonstrada a correlação, definida pela norma ASTM E1876 (2015), entre a frequência fundamental longitudinal ( $f_L$ ), flexional ( $f_F$ ) ou torcional ( $f_T$ ), a massa específica ( $\rho$ ) e as características elásticas do material.



$$E_d = \frac{5,093 \cdot (L \cdot m \cdot f_L^2)}{d^2 \cdot K} \quad (\text{Equação 25})$$

$$E_d = \frac{1,6067 \cdot (L^3 \cdot m \cdot f_F^2 \cdot T_1)}{d^4} \quad (\text{Equação 26})$$

$$G = \frac{16 \cdot (L \cdot m \cdot f_T^2 \cdot R_{E1876})}{d^2 \cdot \pi} \quad (\text{Equação 27})$$

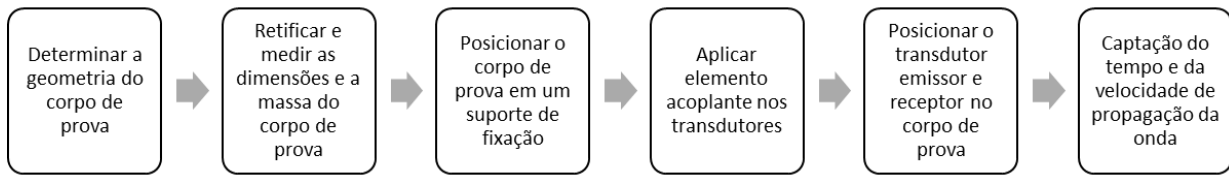
Sendo  $E_d$  o módulo de elasticidade dinâmico (Pa),  $G$  o módulo de cisalhamento (Pa),  $L$  é o comprimento do corpo de prova (mm),  $d$  é o diâmetro (mm),  $m$  é a massa (g),  $f_L$  é a frequência fundamental longitudinal (Hertz),  $f_F$  a frequência fundamental flexional (em Hertz),  $f_T$  é a frequência fundamental torcional (em Hertz),  $K$  é o fator de correção do modo longitudinal,  $R_{E1876}$  é o fator de correção do modo torcional e  $T_1$  é o fator de correção do modo flexional, este último representado pela Equação 28 (Onde  $v_d$  é o coeficiente de Poisson dinâmico).

$$T_1 = 1 + 4,939(1 + 0,0752v_d + 0,8109v_d^2) \left(\frac{D}{L}\right)^2 - 0,4883 \left(\frac{D}{L}\right)^4 - \left[ \frac{4,691(1 + 0,2023v_d + 2,173v_d^2) \left(\frac{D}{L}\right)^4}{1 + 4,754(1 + 0,1408v_d + 1,536v_d^2) \left(\frac{D}{L}\right)^2} \right]$$

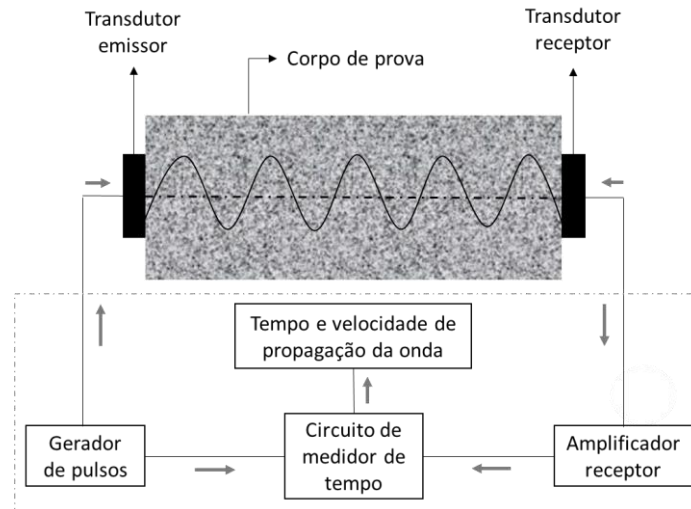
Essas equações já estão configuradas no software utilizado para averiguação do módulo de elasticidade dinâmico por meio do TEI, sendo necessário somente inserir os dados de entrada no programa (dimensão e a massa do material).

### 2.2.2. Velocidade de Pulso Ultrassônico

O método da velocidade de pulso ultrassônico é baseado na propagação de ondas ultrassônicas (alta frequência) através de um material, tendo como parâmetros a amplitude e a velocidade de onda (PERLIN e PINTO, 2013). No fluxograma da Figura 13 apresenta-se a sequência do ensaio e a Figura 14 demonstra esquematicamente o funcionamento do método em um corpo de prova cilíndrico de concreto.



**Figura 13 - Fluxograma do procedimento metodológico para a Velocidade de Pulso Ultrassônico**  
**Fonte: Autor (2020)**



**Figura 14 - Esquema de medição longitudinal em um corpo de prova de concreto cilíndrico pelo método de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)**  
**Fonte: Adaptado da ASTM C597 (2016)**

Os transdutores (um transmissor e outro receptor) são posicionados de maneira centralizada nas faces longitudinais, transversais ou superficiais do corpo de prova de concreto. Para garantir que não haja excentricidade e, conseqüentemente, interferência na medição, às amostras podem ser fixadas em um suporte de madeira (ou outro material) que possibilite o encaixe dos medidores<sup>11</sup>.

Para facilitar a propagação das ondas ultrassônicas, um gel acoplador<sup>12</sup> deve ser aplicado na superfície dos transdutores e do concreto, conforme descrito na NBR 8802 (ABNT, 2019). Após algumas frações de segundos, o equipamento de ultrassom fornecerá a velocidade e o tempo de propagação do pulso ultrassônico da amostra. Uma vez conhecido o valor desta velocidade, a altura do corpo de prova, o coeficiente de Poisson (geralmente assumido como 0,2) e a massa específica do concreto, é possível utilizar a

<sup>11</sup> Um exemplo de suporte é demonstrado na pág. 62 (Figura 38).

<sup>12</sup> Também chamado de elemento acoplante, pode ser silicone, graxa branca, etc. não há indicação normativa para a espessura deste elemento. Contudo nos ensaios deste estudo empregando-se graxa branca observou-se que espessuras muito reduzidas (menos de 0,5 mm) conduzem a elevadas variabilidades no ensaio.

Equação 29 proposta pela norma americana ASTM C597 (2016) para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

$$V = \sqrt{\frac{Ed \cdot (1 - \nu)}{P_{con} \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (\text{Equação 29})$$

Isolando o parâmetro módulo de elasticidade ( $Ed$ ), têm-se a Equação 30:

$$Ed = \frac{V^2 \cdot P_{con} \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{Equação 30})$$

Onde  $Ed$  é o módulo de elasticidade dinâmico ( $\text{N/m}^2$ ),  $V$  é a velocidade da onda ( $\text{m/s}$ );  $P_{con}$  é a massa específica do concreto ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $\nu$  o Coeficiente de Poisson dinâmico.

### 2.3. CORRELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

Para a realização da análise linear de elementos de concreto, é usado o módulo de elasticidade estático. Algumas relações empíricas, válidas ao longo de um alcance limitado de fatores de influência foram desenvolvidas no decorrer dos anos e estão expressas na Tabela 3.

**Tabela 3 - Equações da literatura para estimar o módulo de elasticidade estático do concreto por meio do módulo de elasticidade dinâmico**

Norma	Expressão	Método de Ensaio	Observação	Equação
Popovics (1975)	$E_c = k \cdot E_d^{1,4} \cdot \rho^{-1}$	Ressonância	CC e CL	(31)
Lydon e Balendran (1986)	$E_c = 0,83 \cdot E_d$	Ressonância	CC	(32)
BS 8100-2 (1995)	$E_c = 1,25 \cdot E_d - 19$	-	CC	(33)
	$E_c = 1,04 \cdot E_d - 4,1$	-	CL	(34)
Bogas e Gomes (2014)	$E_c = 0,92 \cdot E_d - 3,74$	Ultrassom	CL	(35)

OBS:  $E_c$ : Módulo de elasticidade estático;  $E_d$ : Módulo de elasticidade dinâmico;  $\rho$ : Densidade do concreto;  $k$ : Constante dependente das unidades de medida; CC: concreto convencional; CL: concreto leve

**Fonte: Autor (2020)**

Estudos recentes demonstram que a heterogeneidade do concreto faz com que a conversão entre os valores de módulo estático e dinâmico seja mais complexa, sendo necessário averiguar, também, os fatores de influência (BOGAS e GOMES, 2014) (ZHOU *et al.*, 2015) (MUSIAŁ e GROSEL, 2016) (LIZARAZO-MARRIAGA e YÉPEZ, 2011) (LEE *et al.*, 2017). Estima-se por meio de estudos que estes valores podem divergir em até 40% dependendo da resistência do concreto e do tipo de agregado graúdo da sua composição (KOCAB *et al.*, 2013) (BOGAS e GOMES, 2014) (MALESEV *et al.*, 2014) (NEVILLE, 2016) (ESTOLANO *et al.*, 2018).

## 2.4. FATORES DE INFLUÊNCIA

Segundo Mehta e Monteiro (2013), os quatro principais fatores de influência do módulo de elasticidade do concreto são: Parâmetros de Ensaio; Matriz da Pasta de Cimento; Zona de Transição na Interface; e Agregados. A descrição dos efeitos destes e de outros fatores podem ser averiguados na Tabela 4 para o módulo estático e na Tabela 5 para o módulo dinâmico.

**Tabela 4 - Fatores de influência e seus efeitos no módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) do concreto**

Fator de Influência	Efeito	Referências	
<b>Parâmetros de ensaio</b>	Estado de Umidade do Corpo de Prova	- O módulo de elasticidade de amostras úmidas ou saturadas é superior às amostras secas, uma vez que se reduz a fissuração na zona de transição no processo de cura.	Mehta e Monteiro (2013) Jocáb <i>et al.</i> (2013) Liu <i>et al.</i> (2014) Maruyama <i>et al.</i> (2014) Zhou <i>et al.</i> (2015) Mydin e Zamzani (2018)
	Condições de Carregamento	- Quanto maior a velocidade de carregamento, maior será o valor do módulo para uma dada tensão.	Montija (2007) Neville (2016)
	Tamanho de Corpos de Prova	- Não possui influência significativa, porém em concretos de alta resistência, o módulo de elasticidade tende a aumentar em corpos de prova menores. Isso é atribuído ao fato de que é necessário haver mais argamassa para preencher o espaço entre as partículas do agregado graúdo e o molde do corpo de prova.	Lee <i>et al.</i> (2015) Neville (2016)
	Sistema de Aquisição de Dados	- Os instrumentos de medição da deformação são muito sensíveis, havendo variações no erro embutido dependendo do fabricante, os quais devem ser corretamente instalados.	Demarchi (2011)
<b>Matriz da pasta de cimento</b>	Porosidade e Módulo de Elasticidade da Matriz da Pasta de Cimento	- Quanto maior a relação água/cimento, a quantidade de vazios de ar aprisionado e/ou a incorporação de ar em amostras de concreto, menor será o módulo de elasticidade. Isso ocorre por conta do progressivo enfraquecimento da matriz cimentícia, fazendo com que haja um aumento da porosidade, afetando (reduzindo) a sua rigidez.	Yildirim e Senguk (2011) Lu <i>et al.</i> (2013) Malesev <i>et al.</i> (2014) Gao <i>et al.</i> (2015) Lee <i>et al.</i> (2015) Musiał e Grosel (2016) Wen <i>et al.</i> (2016) Lee <i>et al.</i> (2017)

Fator de Influência	Efeito	Referências
Adições	- As adições de sílica ativa, cinza volante e escória granulada de alto forno não interferem significativamente no módulo de elasticidade do concreto.	Shannag (2000) Mazloom <i>et al.</i> (2004) Almusallam <i>et al.</i> (2004) Dal Molin (2005) Yildirim e Sengul (2011) Saridemir (2013)
	- O módulo de elasticidade pode aumentar entre 3% a 15% dependendo da quantidade de fibras de aço adicionada em Concreto de Ultra Alto Desempenho (UHPC, do inglês <i>Ultra High Performance Concrete</i> ).	Köksal <i>et al.</i> (2008) Als Salman <i>et al.</i> (2017)
	- Em concretos convencionais, quando a relação agregado graúdo/miúdo (G/M)>1, as fibras de aço polipropileno; macropolioléfinas; álcool polivinílico; e fibras de basalto não influenciam nas propriedades elásticas do concreto. No entanto, quando G/M≤1, o módulo de elasticidade diminui aproximadamente 20% e isso é atribuído aos vazios extras oriundos da adição.	Suksawang, Wtaife e Alsabbagh (2018)
	- Adição de microfibras tem maior recuperação do módulo de elasticidade quando comparado a macrofibras, uma vez que o tamanho das fibras influencia no controle de fissuras.	El-Newihy <i>et al.</i> (2018)
<b>Zona de Transição na Interface</b>	Porosidade e Composição da zona de transição na interface	- Nas primeiras idades do concreto, pode ocorrer microfissuração por conta da porosidade na zona de transição causada pelo excesso de água em torno da partícula de agregado graúdo. O microfissuramento diminui o valor do módulo de elasticidade. Bentur (1990) Simeonov e Ahamd (1995) Mehta e Monteiro (2013) Neville (2016)
<b>Agregado</b>	Porosidade e Módulo de Elasticidade do Agregado Graúdo	- O módulo de elasticidade do concreto é influenciado pelas características geológicas e composição mineral do agregado graúdo, sendo diretamente proporcional à resistência ou dureza da rocha que dá origem ao agregado. - Quanto maior a porosidade do agregado, menor é o módulo do concreto. - Devido sua maior porosidade agregados reciclados tendem a diminuir o módulo de elasticidade do concreto quando comprado com agregados naturais. Shah e Ahmad (1994) Wu <i>et al.</i> (2001) Beshr <i>et al.</i> (2003) Mehta e Monteiro (2013) Yildirim e Sengul (2011) Uysal (2012) Beushausen e Dittmer (2015) Zhou <i>et al.</i> (2015) Piasta <i>et al.</i> (2017) Jurowski e Grzeszczyk (2018)
	Fração Volumétrica do Agregado Graúdo	- Como o agregado, em concreto convencional, é geralmente mais rígido do que a pasta de cimento, aumentar a fração volumétrica fará com que haja um aumento do valor do módulo de elasticidade do conjunto. Mehta e Monteiro (2013) Zhou <i>et al.</i> (2015) Hongyu <i>et al.</i> (2015)
	Tamanho do Agregado Graúdo	- O tamanho do agregado graúdo não é um fator de grande influência no módulo de elasticidade do concreto. Já a otimização da graduação de agregados miúdos <sup>13</sup> (ou empacotamento de partículas), variando em proporções de tamanho, aumenta o módulo. Zhou <i>et al.</i> (2015) Wen <i>et al.</i> (2016)

Fonte: Autor (2020)

<sup>13</sup> Exemplo de otimização de graduação: 30% de agregados miúdos com 5-10 mm, 30% de agregados de 10-16 mm e 40% com 16-20 mm (WEN, YANG, *et al.*, 2016).

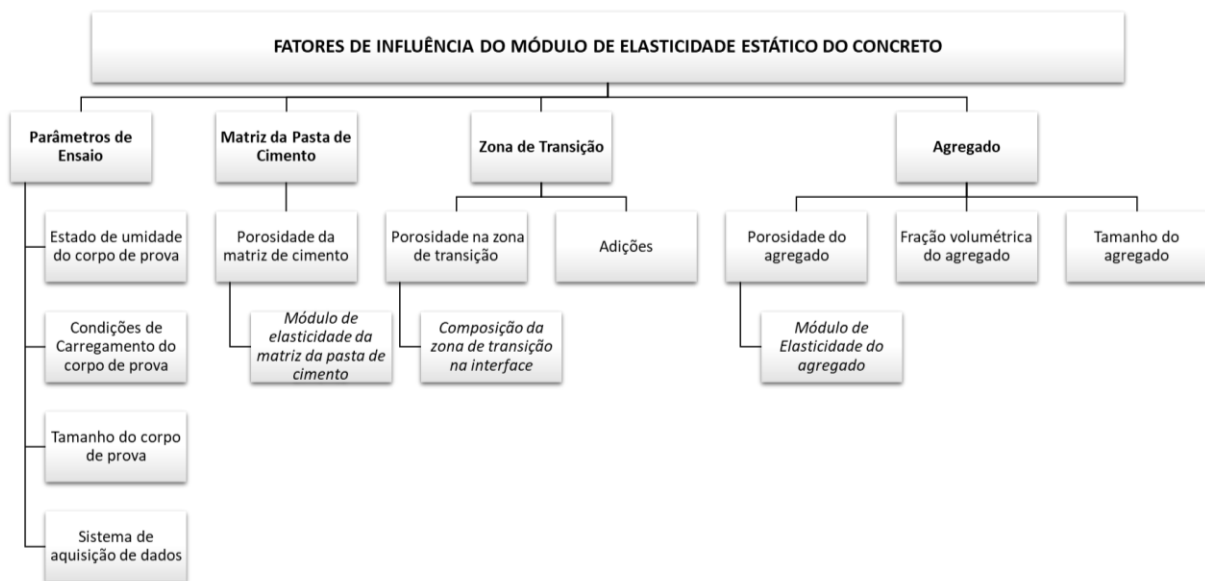
**Tabela 5 - Fatores de influência e seus efeitos no módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) do concreto**

Fator de Influência	Efeito	Referências
Estado de Umidade do Corpo de Prova	- Concretos curados em água tem módulo superior do que aos expostos ao ar.	Kocab <i>et al.</i> (2013)
Tipo de Corpo de Prova	- O valor do módulo de elasticidade do cubo é um pouco inferior ao do corpo de prova prismático.	Pokorny, Jendzelovsky e Konecna (2016)
Sistema de Medição	- Para que os resultados de $E_d$ sejam mais precisos, é recomendada a medição das dimensões e da massa do corpo de prova com ao menos duas casas decimais.	Autor (2020)
<b>Parâmetros de ensaio</b>	<p>Posicionamento do Corpo de Prova no Aparato de Ensaio</p> <p>- Método VPU: A excentricidade na posição dos transdutores na amostra afeta o valor do módulo de elasticidade dinâmico.</p> <p>- Método TEI: Amostras cilíndricas devem estar à uma distância de 0,224·L de cada extremidade do comprimento do corpo de prova</p>	Autor (2020)
Condições e tipos de medição	<p>- Método VPU: A utilização de pouco elemento acoplante entre os transdutores e o corpo de prova de concreto pode provocar mudanças no valor do módulo de elasticidade dinâmico, sendo recomendada a utilização do produto de forma que preencha todos os espaços vazios de contato.</p> <p>- Método TEI: Barulhos externos podem provocar variações no valor do módulo dependendo da sensibilidade do microfone de captação da resposta acústica.</p>	Autor (2020)
<b>Matriz da pasta de cimento</b>	<p>Porosidade e Módulo de Elasticidade da Matriz da Pasta de Cimento</p> <p>- Quanto maior a relação água/cimento, a quantidade de vazios de ar aprisionado e/ou a incorporação de ar em amostras de concreto, menor será o módulo de elasticidade. Isso ocorre por conta do progressivo enfraquecimento da matriz cimentícia, fazendo com que haja um aumento da porosidade, afetando (reduzindo) a sua rigidez.</p>	Lizarazo-Marriaga e Yépez (2011) Alengaram, Mahmud e Jumaat (2011) Bogas e Gomes (2014) Autor (2020)
<b>Agregado</b>	<p>Porosidade e Módulo de Elasticidade do Agregado Graúdo</p> <p>- O módulo de elasticidade do concreto é influenciado pelas características geológicas e composição mineral do agregado graúdo, sendo diretamente proporcional à resistência ou dureza da rocha que dá origem ao agregado.</p> <p>- Quanto maior a porosidade do agregado, menor é o módulo do concreto.</p>	Lizarazo-Marriaga e Yépez (2011) Alengaram, Mahmud e Jumaat (2011) Lu <i>et al.</i> (2013) Bogas e Gomes (2014) Autor (2020)
Tamanho e Fração Volumétrica do Agregado Graúdo	- Como o agregado, em concreto convencional, é geralmente mais rígido do que a pasta de cimento, aumentar o tamanho e a fração volumétrica fará com que haja um aumento do valor do módulo de elasticidade do conjunto.	Zhou <i>et al.</i> (2015) Hongyu <i>et al.</i> (2015) Autor (2020)

**Fonte: Autor (2020)**

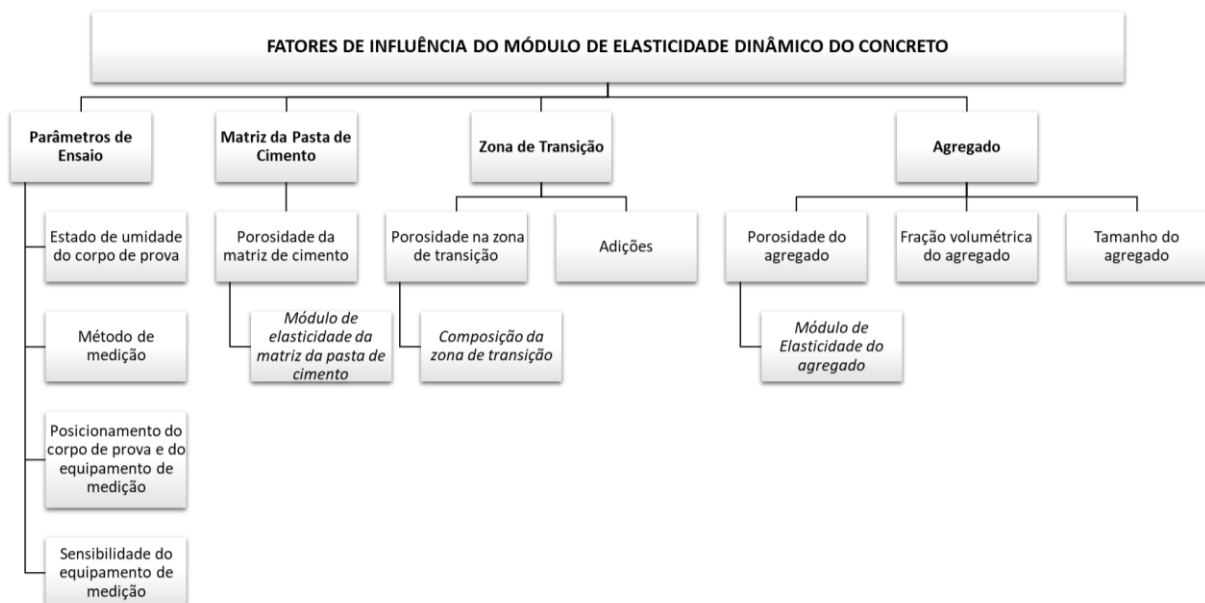
Dos fatores acima citados, a porosidade do concreto, decorrente da relação água/cimento, adições minerais, teor de ar incorporado, distribuição e tipo de agregado graúdo, é um dos fatores mais influentes no valor do módulo de elasticidade (NEVILLE, 2016). Isso ocorre porque a densidade, que é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade, é inversamente proporcional à porosidade, logo, os parâmetros que afetam a porosidade da matriz pasta de cimento, da zona de transição e do agregado, também influenciam no valor final do módulo de elasticidade do concreto (SANTOS *et al.*, 2013).

Além da microestrutura do material, os equipamentos e a maneira que é conduzido o ensaio, tanto o estático quanto o dinâmico também determinam o valor do módulo. Da mesma maneira, a variação de metodologias de ensaios não destrutivos também afeta o resultado do  $E_d$  por cada uma conter seus próprios fatores de influência na medição e equacionamento. Na Figura 15 e 16 consta um resumo dos fatores analisados acima no módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto, respectivamente.



**Figura 15 - Parâmetros de influência do módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) do concreto**

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2013)



**Figura 16 - Parâmetros de influência do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) do concreto**

Fonte: Autor (2020)

Diante da importância do módulo de elasticidade para o projeto de estruturas de concreto, vários estudos foram publicados nos últimos anos levando em consideração as variáveis supracitadas. Na Tabela 7 (Página 40) é possível observar a síntese deles, levando em consideração os tipos de módulo de elasticidade averiguados, os tipos de ensaio empregado, a norma e/ou procedimento utilizado, as variáveis de controle do ensaio experimental, o tipo de concreto de estudo e os principais resultados obtidos. Na Tabela 6 consta a compilação das variáveis de controle em maior quantidade nas pesquisas analisadas.

**Tabela 6 - Resumo das variáveis de estudos dos trabalhos analisados**

Fator de Influência	Variável Geral	Variável Específica	Quantidade de Trabalhos
<b>Parâmetros de Ensaio</b>	Corpo de Prova	Tipo	2
		Idade	10
		Tamanho	1
<b>Matriz da Pasta de Cimento</b>	Cimento	Tipo	2
	Relação a/c	Variação	18
		Fibras de reforço	3
	Adições e Aditivos	Adições minerais	7
		Aditivos	1
	Cura	Tempo	1
		Temperatura	1
Condição		4	
<b>Agregado</b>	Agregado	Tipo	14
		Tamanho	1
		Teor	4

**Fonte: Autor (2020)**

Os parâmetros de influência em maior número dos trabalhos averiguados são: relação água/cimento; tipo e teor de agregado; adições minerais; e condição de cura. Quanto ao tipo do concreto, prevaleceu o concreto convencional (CC), seguido de concreto leve (CL) utilizando diferentes variedades de agregado.

Individualmente, o módulo dinâmico e estático estiveram presentes em 11,43% e 42,86% dos estudos, respectivamente. Embora os números de trabalho contendo somente  $E_d$  seja menor, há um crescente uso do método nos últimos anos por ser mais vantajoso quando comparado ao  $E_c$ . Além de ser não destrutivo, a execução do ensaio é mais rápida, mais barata e, em alguns casos, os equipamentos são transportáveis com facilidade. Porém, como ainda não há estudos suficientes de correlação entre o módulo estático e dinâmico por conta da infinidade de fatores de influência, os autores têm utilizado ambos os métodos (45,71% dos trabalhos) para a comparação de resultados, e assim, encontrar equações que satisfaçam aquele grupo de amostras.



Tabela 7 - Síntese de trabalhos experimentais dos últimos anos sobre módulo de elasticidade do concreto

Autores	Módulo de Elasticidade	Tipo de Ensaio Não Destrutivo	Norma/Procedimento	Variáveis de Controle	Tipo de Concreto	Principais Resultados
Dilek e Leming (2008)	Dinâmico	Ressonância	---	Tipo de agregado Temperatura	CC CL	A redução no módulo de elasticidade, em elevadas temperaturas, é maior para o concreto com agregado convencional do que para concreto de agregado leve <sup>14</sup> .
Turatsinze e Garros (2008)	Estático	---	RILEM CPC8	Tipo de agregado	CL com resíduo de borracha	A incorporação de agregados de borracha no concreto diminui ao módulo de elasticidade, uma vez que esse tipo de agregado reduz a tensão entre a interface borracha/matriz de cimento.
Lizarazo-Marriaga e Yépez (2011)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Tipo de agregado	CAD	Para o concreto de alta resistência, o tipo de agregado influencia significativamente no módulo de elasticidade por conta da variação das propriedades físicas das rochas.
	Dinâmico	Ultrassom	ASTM C597			
Alengaram, Mahmud e Jumaat (2011)	Estático	---	BS EN 1352	Relação a/c Tipo de Agregado	CC CL com casca palmiste	O módulo de elasticidade de concretos com agregado de casca de palmiste é inferior ao concreto convencional por conta da alta incidência de microporos no agregado leve.
	Dinâmico	Ressonância	BS 1881-209			
Yildirim e Sengul (2011)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Dimensão do Agregado Adição de cinza volante	CC	Tanto o tamanho dos agregados como a adição de cinzas volantes não afetam, de maneira expressiva, o módulo de elasticidade do concreto.
	Dinâmico	Ultrassom	ASTM C597			
Parra, Valcuende e Gómez (2011)	Estático	---	BS EN 1352	Relação a/c	CC CAA	O módulo de elasticidade é aproximadamente 2% menor nos concretos auto adensáveis do que no concreto convencional por conter maior volume de pasta.
Hassen e Colina (2012)	Estático	---	---	Variação de Temperatura	CC CAD	Sob condições de serviço e carga constante, o CAD mostra valores mais altos do $E_c$ do que o CC durante a fase de aquecimento-resfriamento.
Shariq, Prasad e Abbas (2013)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Adição de escória granulada de alto forno	CC	A adição de escória granulada de alto forno reduz o $E_c$ do concreto pois ocasiona o aumento no volume da pasta quando substituído, em percentual, o cimento.
Saridemir (2013)	Estático	---	ASTM C469 TS 3502	Adição de sílica ativa e pedra-pomes	CAR	Grande parte dos resultados do $E_c$ das amostras contendo as adições de sílica ativa e pedra-

<sup>14</sup> Os autores recomendam a realização de novas pesquisas laboratoriais, de concreto com agregado leve e convencional em altas temperaturas, a fim de haver mais dados para auxiliar na conclusão dos motivos da diferença da redução entre o módulo de elasticidade do CC e do CL.

Autores	Módulo de Elasticidade	Tipo de Ensaio Não Destrutivo	Norma/Procedimento	Variáveis de Controle	Tipo de Concreto	Principais Resultados
						pomes foram maiores do que a mistura de controle. <sup>15</sup>
Lu <i>et al.</i> (2013)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Tipo de agregado Tipo de corpo de prova	CC	O tipo de agregado tem influência considerável sobre o $E_c$ e $E_d$ . Já o tipo de corpo de prova não tem influência significativa.
	Dinâmico	Ressonância Excitação por impulso	ASTM C215			
Kocab <i>et al.</i> (2013)	Estático	---	---	Tempo e tipo de cura	CC	Concretos expostos ao ar tem elevação do módulo somente até os 28 dias, já em concretos curados em água o módulo continua aumentando até 90 dias. Na mesma idade, concretos curados em água tem módulo superior do que aos expostos ao ar, por causa do aumento de microfissuras deste último grupo.
	Dinâmico	Ultrassom Ressonância	---			
Bahr <i>et al.</i> (2013)	Dinâmico	Excitação por impulso	---	Temperatura	CC	O módulo de elasticidade dinâmico diminui com o aumento da taxa de temperatura.
Liu <i>et al.</i> (2014)	Estático	---	GB/T 50081	Tipo de cura	CC	Conforme aumenta o teor da umidade da cura, o módulo de elasticidade também aumenta.
Galobardes <i>et al.</i> (2014)	Estático	---	UNE 83316	Aditivos	CAA	Dependendo das características do aditivo acelerador, ele pode causar o aumento do módulo de elasticidade.
Bogas e Gomes (2014)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Tipo de agregado	CC CL com argila expandida	O módulo de elasticidade de concretos com agregado leve de argila expandida foi subestimado em menos de 20% para a maioria das expressões normativas analisadas.
	Dinâmico	Ultrassom	BS EN 12504-4			
Maruyama <i>et al.</i> (2014)	Estático	---	---	Teor de agregado Temperatura	CC	O módulo de elasticidade diminui com a exposição do concreto em altas temperaturas, pois causa abertura de fissuras devido a diferenças na variação de volume entre o agregado e a argamassa.
Malesev <i>et al.</i> (2014)	Estático	---	ISO 6784	Relação a/c Tipo de Agregado	CC CL com argila expandida	Os valores do módulo de elasticidade do concreto com argila expandida são significativamente menores que os valores do concreto comum.
	Dinâmico	Ultrassom	---			
Zhou <i>et al.</i> (2015)	Estático	---	GB/T 50081	Relação a/c	CC	Quanto maior é o teor e a dureza do agregado graúdo, maior será o módulo de elasticidade.

<sup>15</sup> Saridemir (2013) concluiu que a melhor combinação para elevar o módulo de elasticidade do concreto é a mistura de 15% sílica ativa junto com 5% pedra-pomes.

Autores	Módulo de Elasticidade	Tipo de Ensaio Não Destrutivo	Norma/Procedimento	Variáveis de Controle	Tipo de Concreto	Principais Resultados
	Dinâmico	Ressonância	ASTM C215	Tipo e teor de agregado Temperatura de cura		A temperatura da cura não tem grande influência no valor do módulo de elasticidade estático e dinâmico.
Hongyu <i>et al.</i> (2015)	Estático	---	ASTM C469	Teor de agregado	CC	O método da resistividade elétrica é capaz de fornecer uma maneira eficaz de monitorar o módulo de elasticidade do concreto. Quanto maior o teor de agregado, maior é o módulo de elasticidade.
	Dinâmico	Ultrassom Resistividade elétrica	---			
Lee <i>et al.</i> (2015)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Tamanho do corpo de prova	CC CAR	O módulo de elasticidade de corpos de prova cilíndricos 100 por 200 mm é cerca de 10% superior aos de 150 por 300 mm.
	Dinâmico	Ressonância Ultrassom	ASTM C215 ASTM C597			
Awal, Mohammadhosseini e Hossain (2015)	Estático	---	ASTM C469	Tipo de Agregado	CL com resíduo de borracha	O módulo de elasticidade diminui com o aumento do teor de agregado de borracha.
	Dinâmico	Ultrassom	---			
Beushausen e Dittmer (2015)	Estático	---	BS 1881-121 ASTM C469	Relação a/c Tipo de agregado	CC	Concreto de agregado de andesito tem um módulo de elasticidade maior quando comparado com concreto de agregado de granito.
Wen <i>et al.</i> (2016)	Estático	---	GB/T 50081	Relação a/c Teor de agregado	CAD	Quanto maior o teor de agregado, maior é o valor do módulo de elasticidade.
Pokorny, Jendzelovsky e Konecna (2016)	Dinâmico	Ultrassom Ressonância	STN 73 1371 STN 73 2011	Tipo de corpo de prova	CC	O valor do módulo de elasticidade do cubo é um pouco inferior ao do corpo de prova prismático.
Musial e Grosel (2016)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c	CC	O aumento da relação a/c diminui o valor do módulo de elasticidade do concreto. O método <i>Eigenfrequency</i> é indicado para verificar o módulo de elasticidade de elementos de concreto com trincas.
	Dinâmico	Ressonância <i>Eigenfrequency</i>	ASTM C215			
Milicevic, Stirmer e Bjegovic (2016)	Estático	---	HRN EN 12390	Tipo de agregado	CL	A incorporação de agregados de tijolos e telha reduz módulo de elasticidade
	Dinâmico	Ultrassom	---			
Shen <i>et al.</i> (2016)	Estático	---	DL/T 5150	Adição de cinza volante	CAR	O valor do $E_c$ do concreto de alta resistência com cinza volante ensaiado por tração é maior do que por compressão.
Lee <i>et al.</i> (2017)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c	CC	Os valores de $E_d$ obtidos nos testes da ressonância e velocidade de pulso ultrassônico são maiores que o $E_c$ .
	Dinâmico	Ultrassom Ressonância	ASTM C597 ASTM C215			

Autores	Módulo de Elasticidade	Tipo de Ensaio Não Destrutivo	Norma/Procedimento	Variáveis de Controle	Tipo de Concreto	Principais Resultados
Alsaman <i>et al.</i> (2017)	Estático	---	ASTM C469	Tipo de Agregado Adição de fibra de aço	CUAD	O uso de cinzas volantes como agregado miúdo tem pouco efeito no módulo de elasticidade em comparação com a areia natural. A fibra de aço somente surte efeito no aumento do módulo, impedindo a propagação de microfissuras. quando adicionado acima de 6% do volume da mistura.
Santos <i>et al.</i> (2017)	Estático	---	NBR 8522	Relação a/c Tipo de Agregado	CC	A mudança da fonte mineralógica do mesmo tipo de agregado graúdo tem pouco efeito sobre o $E_c$ . A pasta de cimento com relação a/c elevada se torna mais importante do que o agregado na influência do $E_c$ por conta da sua alta porosidade.
Piasta, Gora e Budzynski (2017)	Estático	---	---	Relação a/c Tipo de Agregado	CC CAD	Concretos com agregado de dolomita, granito e quartzito apresentam resultados diferentes de $E_c$ com a mesma relação a/c por conta das propriedades físicas de cada tipo de rocha.
Estolano <i>et al.</i> (2018)	Estático	---	NBR 8522	Relação a/c Tipo de Agregado	CC	O $E_c$ e $E_d$ é uma propriedade sensível à incorporação de agregados reciclados oriundos de resíduos de pré-fabricados de concreto, uma vez que aumenta a porosidade e diminui o módulo de elasticidade.
	Dinâmico	Ultrassom	ASTM C597			
Zhu <i>et al.</i> (2018)	Estático	---	ASTM C469	Relação a/c Adição de nanofibras de carbono	CC	Concretos reforçados com adição de nanofibras de carbono aumentam as propriedades mecânicas da zona de transição interfacial, o que, por sua vez, aumenta o módulo de $E_c$ .
El-Newihy <i>et al.</i> (2018)	Dinâmico	Ressonância	ASTM C215	Adição de fibras de polipropileno	CC	Adição de microfibras tem maior recuperação do $E_d$ quando comparado a macrofibras, uma vez que o tamanho das fibras influencia no controle de fissuras.
Jurowski e Grzeszyk (2018)	Estático	---	EN 12390-13	Tipo de agregado	CC	Por ter grande influência no módulo de elasticidade, o coeficiente de proporcionalidade entre o módulo estático e dinâmico é dependente do tipo de agregado utilizado.
	Dinâmico	Excitação por impulso	EN 12680-1			

CC: Concreto convencional; CAD: concreto de alto desempenho; CAR: concreto de alta resistência; CAA: concreto auto adensável; CL: concreto leve; CUAD: concreto de ultra-alto desempenho.

Fonte: Autor (2020)

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como a presente pesquisa visa avaliar comparativamente o módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto considerando a influência do teor de agregado graúdo, relação água cimento e tipo de agregado graúdo, foram produzidas 37 dosagens de concreto.

As amostras de concreto foram constituídas por três relações água/cimento (0,45, 0,55 e 0,65), representando respectivamente as classes de agressividade ambiental I, II, III e IV da NBR 6118 (ABNT, 2014), quatro teores de agregado graúdo (60%, 54%, 48% e 42%) e, para o agregado graúdo, três fontes mineralógicas distintas (Foz do Iguaçu-PR, Toledo-PR e Guarapuava-PR). Para verificar o comportamento do módulo de elasticidade no tempo, foi realizada uma dosagem específica para as idades 1, 3, 7, 28 e 91 dias. O fluxograma dos procedimentos metodológicos é apresentado na Figura 17.

TEOR DE AGREGADO GRAÚDO	RELAÇÃO A/C	ORIGEM DO AGREGADO	IDADE DE ENSAIO
60%	0,45	Foz do Iguaçu-PR	7 dias*
54%	0,55	Toledo-PR	
48%	0,65	Guarapuava-PR	
42%			
<i>*Somente para o agregado de Foz do Iguaçu-PR</i>			
48%	0,65	Toledo-PR	1, 3, 7, 28 e 91 dias

**Figura 17 - Quadro dos parâmetros controláveis**

Fonte: Autor (2020)

Para as determinações experimentais do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), foram utilizados os métodos de Velocidade de Pulso Ultrassônico (ASTM C-597, 2016) e da Técnica de Excitação por Impulso (ASTM E-1876, 2015). O módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ) foi realizado conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017).

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Tendo em vista a imprescindibilidade do conhecimento da composição, propriedades e estrutura dos materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de concreto, foram realizados ensaios de caracterização do cimento, do agregado miúdo e agregado graúdo empregados no estudo. Na Tabela 8 consta o tipo de ensaio, a norma associada e o local de realização dos testes.

**Tabela 8 - Ensaios de caracterização do cimento, agregado miúdo e graúdo**

<b>Materiais</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Norma Associada</b>	<b>Local</b>
Cimento	Massa específica	NBR 16605 (2017)	LADEMA
	Finura Blaine	NBR 16372 (2015)	LADEMA
	Ensaio de área superficial BET	-	LADEMA
	Granulometria a laser	-	LADEMA
	Análises químicas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)	-	LCT
Agregado miúdo	Granulometria e $D_{máx}$	NBR NM 248 (2003)	LADEMA
	Massa Unitária	NBR NM 45 (2006)	LADEMA
	Massa Específica	NBR NM 52 (2009)	LTCI
Agregado graúdo	Granulometria e $D_{máx}$	NBR NM 248 (2003) NBR 7211 (2009))	LADEMA
	Massa Específica	NBR NM 53 (2009)	LADEMA
	Análise Petrográfica	NBR 7389-2 (2009)	LTCI
	Módulo de Elasticidade	ASTM E-1876 (2015)	LTCI
	Resistência ao Esmagamento	NBR 9938 (2013)	LTCI
	Índice de Carga Pontual	ASTM D5731 (2008)	LTCI
	Análises químicas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)	-	LAMIR
Análises mineralógicas por Difractometria de Raios-X (DRX)	-	LICF	

LCT: Laboratório de Caracterização Tecnológica - USP

LADEMA: Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais - UNILA

LAMIR: Laboratório de Análise de Minerais e Rochas - UFPR

LTCI: Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu – Itaipu Binacional

LICF: Laboratório Interdisciplinar de Ciências Físicas - UNILA

**Fonte: Autor (2020)**

#### 3.1.1. Cimento

O cimento utilizado no presente estudo foi o CP-V ARI, com massa específica aferida de 2,99 g/cm<sup>3</sup> e área superficial volumétrica BET de 8,685 cm<sup>2</sup>/g. Para a análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), a amostra de cimento foi prensada, na calibração STD-1 (Standardless), e a análise ocorreu

sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio. O equipamento espectrômetro utilizado foi da marca Malvern Panalytical, modelo Zetium, no Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP. A perda ao fogo foi realizada a 1.020°C por 2 horas. Na Tabela 9 é possível verificar os resultados obtidos.

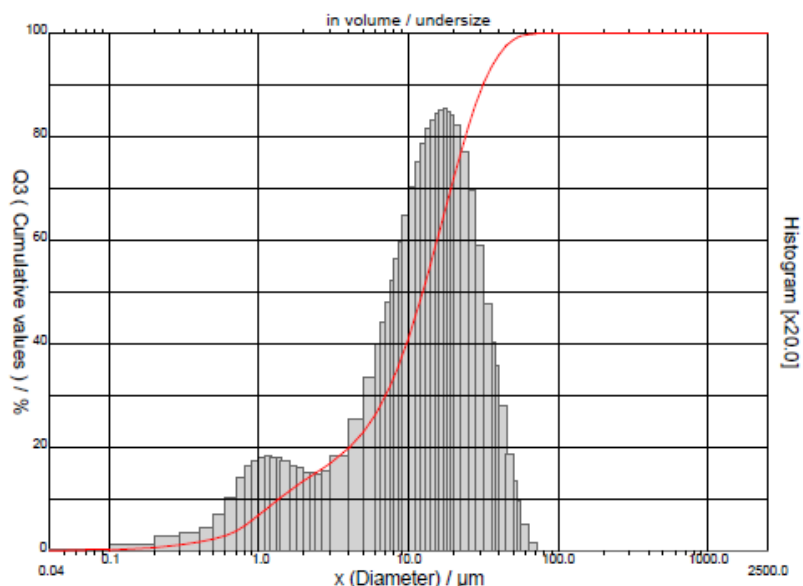
**Tabela 9 - Resultados de FRX para o cimento Portland**

Composto	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Outros	PF
(%)	60,6	16,2	4,24	4,22	4,14	3,73	1,41	0,64	0,4	0,19	0,35	3,86

Fonte: Autor (2020)

Em comparação com os requisitos químicos estabelecidos na NBR 5733 (ABNT, 1991) para cimento Portland de alta resistência inicial, a amostra atendeu os requisitos de perda ao fogo (PF) e óxido de magnésio (MgO). Já para o trióxido de enxofre<sup>16</sup> (SO<sub>3</sub>), o valor está acima do limite permitido (3,5%).

O ensaio de granulometria a laser (Figura 18) foi conduzido no granulômetro da marca CILAS modelo 1190, em modo líquido (água), sem agente dispersante, com obscuração de 0,55% empregando para as análises a teoria de Mie. O cimento empregado possui uma distribuição de partículas bimodal, com diâmetro médio das partículas de 12,32 µm.



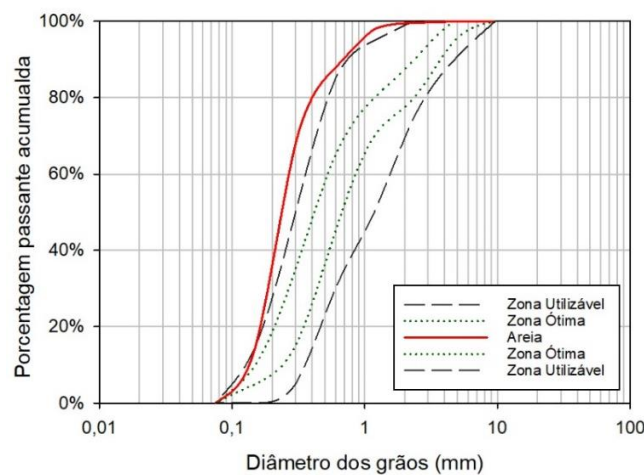
**Figura 18 - Resultado do ensaio de granulometria a laser para o cimento**

Fonte: Autor (2020)

<sup>16</sup> Para saber o limite do trióxido de enxofre (SO<sub>3</sub>) conforme a NBR 5733 (1991), é necessário quantificar o aluminato tricálcico contido no clínquer por meio da fórmula: (C<sub>3</sub>A%) = 2,65 x (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%) - 1,692 x (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>%).

### 3.1.2. Agregado Miúdo

Como agregado miúdo foi empregada areia quartzosa, sem presença de silte ou argila. Por meio da curva granulométrica (Figura 3) e com a maioria dos grãos compreendidos entre 0,06 mm e 0,20 mm de diâmetro, foi possível classificá-la como predominante fina (módulo de finura de 1,32). Com coeficiente de não uniformidade<sup>17</sup> (CNU) inferior a 5 e coeficiente de curvatura (CC) inferior a 1, é considerada não muito uniforme e mal graduada.



**Figura 19 - Curva granulométrica da areia conforme NBR 7211 (ABNT, 2009)**

Fonte: Autor (2020)

**Tabela 10 - Síntese dos valores de caracterização da areia**

D <sub>máx</sub> (mm)	Módulo de finura	CNU	CC	Massa específica <sup>1</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica <sup>2</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
1,20	1,32	2,00	0,30	2,96	2,98	3,06	0,98	1,56

CNU: coeficiente de não uniformidade

CC: coeficiente de curvatura

<sup>1</sup>: do agregado seco

<sup>2</sup>: do agregado na condição saturado superfície seca

<sup>3</sup>: aparente

Fonte: Autor (2020)

Constata-se que o agregado miúdo está fora da zona utilizável da NBR 7211 (ABNT, 2009), não sendo a mais recomendada para produção de concreto devido sua alta finura. Contudo, por questão da indisponibilidade na região de uma areia com maior módulo de finura para a confecção dos corpos de prova, optou-se pela utilização desta.

<sup>17</sup> O coeficiente de não uniformidade é a razão entre o diâmetro onde se situam 60% e o diâmetro no qual se situam 10% da amostra da areia.



### 3.1.3. Agregado Graúdo

A fim de verificar a influência do tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade do concreto, foram coletados aproximadamente 250 kg de brita com diâmetro máximo de 19 mm e três blocos de rocha (Figura 22) de três jazidas do terceiro planalto paranaense: Foz do Iguaçu-PR, Toledo-PR e Guarapuava-PR (Figura 20) para a realização dos ensaios laboratoriais<sup>18</sup> e a produção dos corpos de prova de concreto. As amostras foram coletadas diretamente do local de despejo dos agregados nas pedreiras (Figura 21).



**Figura 20 - Locais da extração do agregado graúdo utilizado no estudo experimental**  
**Fonte: Adaptado de Wikipédia (2020)**



**Figura 21 - Local de coleta do agregado graúdo da jazida de Guarapuava-PR**  
**Fonte: Autor (2020)**



Foz do Iguaçu-PR



Toledo-PR

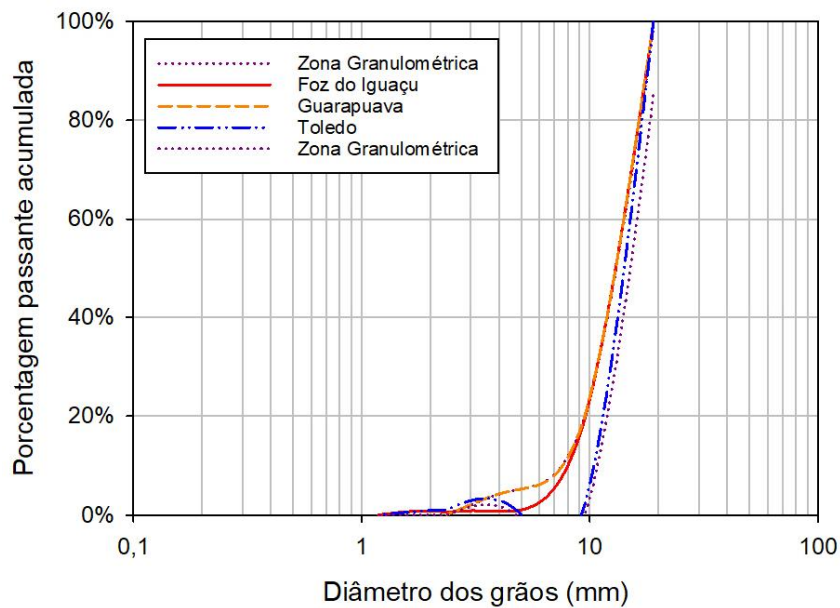


Guarapuava-PR

**Figura 22 - Bloco de rocha sobre agregado graúdo de cada jazida do terceiro planalto paranaense**  
**Fonte: Autor (2020)**

<sup>18</sup> Os resultados gerados da caracterização das rochas foram enviados às empresas de mineração que colaboraram com a pesquisa por meio de doação do material. Os resultados visam auxiliá-las quanto a atualização da composição e características das rochas locais.

Após realizado o ensaio de granulometria dos agregados graúdos, conforme a NBR NM 248 (ABNT, 2003), foi constatado que os agregados de Guarapuava-PR se encontravam fora da zona granulométrica da NBR 7211 (ABNT, 2009). Para que não houvesse influência do tamanho do agregado no módulo de elasticidade, as britas foram peneiradas para que estivessem dentro dos limites necessários, igualando aos agregados de Foz do Iguaçu-PR e Toledo-PR. O resultado da distribuição da curva granulométrica dos agregados está apresentado na Figura 23.



**Figura 23 - Curva granulométrica dos agregados graúdos**  
Fonte: Autor (2020)

Os respectivos valores da massa específica, massa unitária, absorção, módulo de finura e diâmetro máximo são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Síntese dos valores de caracterização granulométrica, massa específica, massa unitária e absorção dos agregados graúdos**

Agregado graúdo	D <sub>máx</sub> (mm)	Módulo de finura	Massa específica <sup>1</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica <sup>2</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )
Foz do Iguaçu-PR	19	6,789	2,96	2,98	3,06	0,68	1,56
Guarapuava-PR	19	6,948	2,85	2,90	3,03	1,07	1,51
Toledo-PR	19	6,468	2,80	2,83	2,97	1,49	1,52

<sup>1</sup>: do agregado seco

<sup>2</sup>: do agregado na condição saturado superfície seca

<sup>3</sup>: aparente

Fonte: Autor (2020)

Conforme o guia de avaliação da qualidade do agregado (Tabela 12), a massa específica seca das amostras de Foz do Iguaçu-PR é considerada excelente e a de Toledo-PR e Guarapuava-PR considerada boa. Já a absorção de água é considerada boa para todos os agregados.

**Tabela 12 - Guia de avaliação da qualidade do agregado graúdo**

Ensaio	Classificação			
	Excelente	Boa	Regular	Ruim
Massa específica seca (g/cm <sup>3</sup> )	>2,9	2,6-2,9	2,3-2,6	<2,3
Absorção de água (%)	<0,5	0,5-2,0	2,0-6,0	>6,0
Resistência à compressão simples (MPa)	>200	100-200	50-100	<50
Resistência à carga pontual (MPa)	>8,0	4,0-8,0	1,5-4,0	<1,5

**Fonte: Adaptado de Verhoef e Van der Wall (1998)**

### 3.1.3.1. Análise Petrográfica

Segundo o Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná (2019), a região das amostras de rochas contém efusivas básicas toleíticas com basaltos maciços e amigdalóides provenientes de derrames de vulcanismo de fissura continental, contudo para a caracterização detalhada de cada jazida, foi realizada a análise petrográfica tradicional de luz transmitida.

As lâminas delgadas foram elaboradas no Laboratório de Tecnologia de Concreto de Itaipu (LTCI) e as imagens, análise microscopia e descrição petrográfica foram realizadas no Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB).

As análises foram realizadas conforme a NBR 7389 (ABNT, 2009) e objetivaram inteirar-se sobre os primordiais aspectos petrográficos e mineralógicos das rochas, enfatizando a composição mineralógica, o estado de alteração dos minerais, a estrutura, a textura e o grau e tipo de microfissuração.

### 3.1.3.2. FRX

A análise química semiquantitativa por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) foi realizada por meio do equipamento PANalytical Axios Max do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da UFPR.

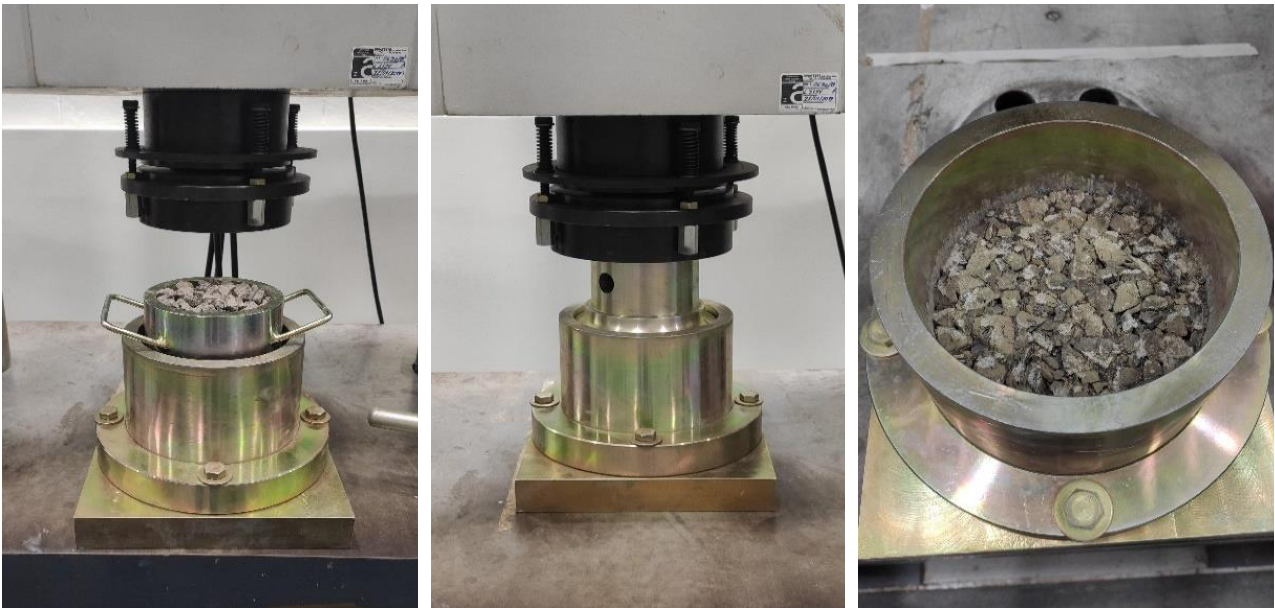
### 3.1.3.3. Ensaio de Esmagamento

Para realizar o ensaio de esmagamento, foram selecionadas amostras de britas de diâmetro entre 9,5 e 12,7 mm de cada rocha e determinada sua massa pré-compactada com 25 golpes em um cilindro de aço rígido. Após o procedimento inicial, os agregados foram submetidos à compressão (Figura 24), a uma velocidade de 40 kN/min, até atingir 400 kN.

Após a aplicação da carga, foi determinada a massa do resíduo retido na peneira de abertura 2,4 mm e determinada a resistência ao esmagamento, em porcentagem, empregando-se a Equação 36.

$$R(\%) = \frac{(M_i - M_f) \cdot 100\%}{1000} \quad \text{Equação (36)}$$

Onde  $R$  é a resistência ao esmagamento do agregado, em porcentagem,  $M_i$  é a massa inicial e  $M_f$  a massa final retida na peneira 2,4 mm. O procedimento foi realizado duas vezes para cada amostra a fim de ser calculada a média do resultado, conforme recomendação da NBR 9938 (ABNT, 2013).



**Figura 24 - Realização do ensaio de esmagamento**  
**Fonte: Autor (2020)**

### 3.1.3.4. Índice de Carga Pontual

Para determinar o valor da resistência à compressão uniaxial das rochas, foi adotado o ensaio de Índice de Carga Pontual no qual consiste na aplicação de uma carga concentrada em amostras irregulares de rochas. Neste estudo, foram realizadas, em 11 amostras de cada rocha, a medição da altura e do diâmetro e, em seguida, foram rompidas através da aplicação de uma carga concentrada, com precisão de 1kgf/cm<sup>2</sup>, em duas ponteiros cônicos (Figura 25).



**Figura 25 - Equipamento e ponteiros cônicos no ensaio de índice de carga pontual**

Fonte: Autor (2020)

O valor da aplicação da carga ( $Q$ ) foi determinada por meio da Equação 37, segundo a norma D5731 (ASTM, 2008) e as amostras foram classificadas de acordo com a Tabela 13.

$$Q = 0,328 \cdot p - 0,2158 \quad \text{Equação (37)}$$

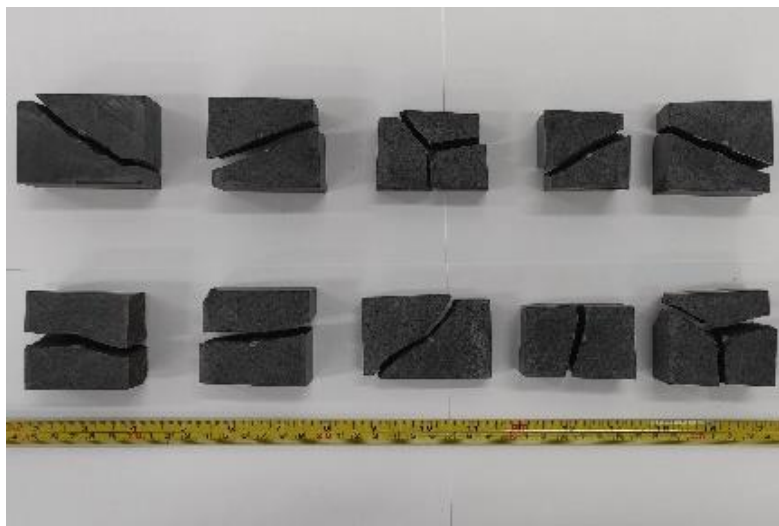
No qual  $p$ , em kgf/cm<sup>2</sup>, é a pressão registrada no manômetro e  $Q$  a força que deve ser aplicada em kN.

**Tabela 13 - Classificação do Is50**

Is50 (MPa)	Classificação de Resistência
<0,03	Extremamente baixa
0,03 – 0,1	Muito baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 1,0	Média
1,0 – 3,0	Alta
3,0 – 10,0	Muita alta
> 10	Extremamente alta

**Fonte: Broch & Franklin (1972)**

Além de conferir o modo no qual a amostra foi rompida para verificar se enquadra nos quesitos da norma (Figura 26), foram também descartados os 2 maiores e menores valores para efetuar a média da resistência.



**Figura 26 - Análise das amostras das rochas após o ensaio de resistência à compressão puntiforme**  
**Fonte: Autor (2020)**

### 3.1.3.5. Módulo de Elasticidade

Para a averiguação do módulo de elasticidade da rocha, foi utilizado o método da Técnica de Excitação por Impulso (TEI), apresentado no tem 2.2.1, o qual consiste na determinação do módulo a partir das frequências naturais de vibração. As amostras de rochas foram cortadas em dois formatos geométricos distintos (Figura 27): 2 barras de seção quadrada (100x15x15 mm) e 5 barras<sup>19</sup> de seção retangular

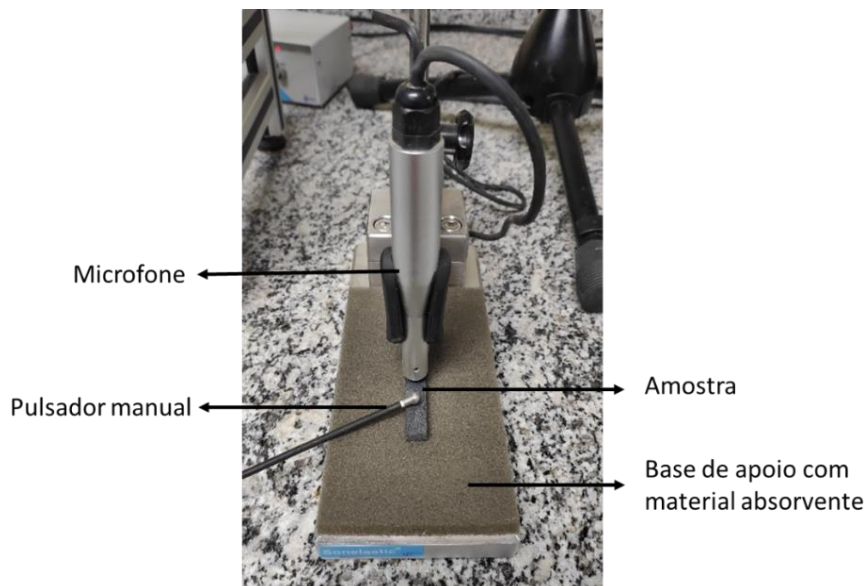
<sup>19</sup> Devido à baixa variabilidade do ensaio não são necessárias muitas amostras.

(40x10x4 mm). As dimensões foram estabelecidas conforme recomendação do fabricante do equipamento do ensaio<sup>20</sup>.



**Figura 27 - Amostras de rochas para a realização do ensaio de módulo de elasticidade**  
**Fonte: Autor (2020)**

As amostras secas ao ar foram pesadas, tomadas as medidas geométricas e posicionadas em um suporte almofadado (Figura 28). Em seguida, foram excitadas com um leve impulso manual a fim de obter a resposta acústica captada pelo microfone do aparelho de ensaio. Os resultados foram expressos no software do equipamento, em MPa.



**Figura 28 - Excitação na amostra de rocha para determinação do módulo de elasticidade das rochas em estudo**  
**Fonte: Autor (2020)**

<sup>20</sup> Para barra de seção quadrada, a razão entre o comprimento e a aresta deve ser maior ou igual a 3. Já para a barra de seção retangular, a razão entre o comprimento e a largura deve ser maior ou igual a 4 e a razão entre a largura e a espessura deve ser menor ou igual a 8.

### 3.2. DOSAGEM E PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para realizar o cálculo teórico da dosagem das amostras de concreto, foi atribuído o valor<sup>21</sup> de  $m$ , na fórmula do método IPT (HELENE e TERZIAN, 1992), igual a 4,5; 5,8 e 7,1 para relação a/c de 0,45; 0,55 e 0,65, respectivamente. Os valores da massa específica do cimento, da areia e dos basaltos são provenientes dos ensaios de caracterização. O consumo de água foi fixo e, como as massas específicas dos agregados graúdos são diferentes, foi mantido constante o volume da brita por m<sup>3</sup> em todas as concretagens. Na Tabela 14 é exposto os valores calculados para a dosagem das amostras de concreto.

**Tabela 14 - Amostra experimental teórica do projeto de pesquisa**

Mistura	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Teor de agregado graúdo ( $\beta$ )	a/c	Aditivo	$m$	Tipo de Agregado
1	1	1,20	3,30	60%	0,45	-	4,5	
2	1	1,72	4,08	60%	0,55	-	5,8	
3	1	2,24	4,86	60%	0,65	-	7,1	
4	1	1,53	2,97	54%	0,45	0,001	4,5	
5	1	2,13	3,67	54%	0,55	0,001	5,8	
6	1	2,73	4,37	54%	0,65	0,001	7,1	
7	1	1,86	2,64	48%	0,45	0,004	4,5	Basalto Foz do Iguaçu
8	1	2,54	3,26	48%	0,55	0,002	5,8	
9	1	3,21	3,89	48%	0,65	0,002	7,1	
10	1	2,19	2,31	42%	0,45	0,004	4,5	
11	1	2,94	2,86	42%	0,55	0,004	5,8	
12	1	3,70	3,40	42%	0,65	0,004	7,1	
13	1	1,20	3,30	60%	0,45	-	4,5	
14	1	1,72	4,08	60%	0,55	-	5,8	
15	1	2,24	4,86	60%	0,65	-	7,1	
16	1	1,53	2,97	54%	0,45	0,001	4,5	
17	1	2,13	3,67	54%	0,55	0,001	5,8	
18	1	2,73	4,37	54%	0,65	0,001	7,1	Basalto Toledo
19	1	1,86	2,64	48%	0,45	0,004	4,5	
20	1	2,54	3,26	48%	0,55	0,002	5,8	
21	1	3,21	3,89	48%	0,65	0,002	7,1	
22	1	2,19	2,31	42%	0,45	0,004	4,5	

<sup>21</sup> Como na literatura há divergência a respeito do valor de  $m$ , os valores adotados no trabalho foram obtidos por meio de experiências em estudos de dosagem de uma indústria de concreto situada na cidade de Cascavel-PR. Os valores são resultados da consistência do concreto aferida por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (considerando 80 mm) e é diretamente proporcional à relação água/cimento.



Mistura	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Teor de agregado graúdo ( $\beta$ )	a/c	Aditivo	m	Tipo de Agregado
23	1	2,94	2,86	42%	0,55	0,004	5,8	Basalto Guarapuava
24	1	3,70	3,40	42%	0,65	0,004	7,1	
25	1	1,20	3,30	60%	0,45	-	4,5	
26	1	1,72	4,08	60%	0,55	-	5,8	
27	1	2,24	4,86	60%	0,65	-	7,1	
28	1	1,53	2,97	54%	0,45	0,001	4,5	
29	1	2,13	3,67	54%	0,55	0,001	5,8	
30	1	2,73	4,37	54%	0,65	0,001	7,1	
31	1	1,86	2,64	48%	0,45	0,004	4,5	
32	1	2,54	3,26	48%	0,55	0,002	5,8	
33	1	3,21	3,89	48%	0,65	0,002	7,1	
34	1	2,19	2,31	42%	0,45	0,004	4,5	
35	1	2,94	2,86	42%	0,55	0,004	5,8	
36	1	3,70	3,40	42%	0,65	0,004	7,1	

Fonte: Autor (2020)

Ao todo, foram moldados 370 corpos de prova de concreto (Figura 29 e 30) de dimensão 10x20 cm para atender os ensaios físicos e mecânicos da pesquisa.



Figura 29 - Corpos de prova no estado fresco  
Fonte: Autor (2020)



Figura 30 - Corpos de prova de concreto no estado endurecido  
Fonte: Autor (2020)

### 3.3. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

Os ensaios de resistência à compressão e do módulo de elasticidade estático e dinâmico foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu – LTCl. Já os ensaios do estado fresco foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais – LADEMA/UNILA no ato de produção dos concretos. Como o ensaio dinâmico é não destrutivo, os corpos de prova destes ensaios foram os mesmos utilizados para o ensaio estático.

Para a realização do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico foi aplicado um elemento acoplante (graxa branca) nos transdutores, logo, as faces longitudinais do corpo de prova tiveram que ser limpas para o ensaio seguinte. Desta maneira, por questões práticas, a realização dos ensaios de módulo de elasticidade ocorreu na seguinte ordem: 1 - Técnica de Excitação por Impulso; 2 – Velocidade de Pulso Ultrassônico; e 3 - Ensaio Estático.

Na Tabela 15 estão descritas as propriedades físicas e mecânicas que serão avaliadas no estado fresco e endurecido para cada amostra, bem como as normas representativas de cada ensaio, a idade do ensaio e o número de corpos de prova necessário segundo as normas vigentes.

**Tabela 15 - Ensaios realizados para avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos**

Estado do Concreto	Ensaio	Norma Associada	Nº de CPs
Estado Fresco	Abatimento	NBR NM 67 (1998)	-
	Massa específica	NBR 9833 (2008)	3
Estado Endurecido	Resistência à compressão	NBR 5739 (2018)	2
	Módulo de elasticidade estático ( $E_c$ )	NBR 8522 (2017)	3
	Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ )	Ultrassom ASTM C-597 (2016)	6
		TEI ASTM E-1876 (2015)	

\*OBS: Dos 6 corpos de prova utilizados para o módulo de elasticidade dinâmico, 3 foram utilizados para o ensaio de módulo de elasticidade estático e 2 para a resistência à compressão.

**Fonte: Autor (2020)**

### 3.3.1. Preparo dos Corpos de Prova

Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram retificados (Figura 31), verificada a massa com uma balança de precisão de 0,50 gramas e aferido três medidas do diâmetro e comprimento com paquímetro digital para a determinação da dimensão média (Figura 32). Os resultados tabelados foram empregados nos ensaios de módulo de elasticidade.



**Figura 31 - Retificação do corpo de prova**  
Fonte: Autor (2020)



**Figura 32 - Medição do corpo de prova**  
Fonte: Autor (2020)

### 3.3.2. Resistência à Compressão

A resistência à compressão do concreto (em  $f_c$ ) foi determinada por meio do ensaio de compressão uniaxial (Figura 33), em máquina de classe I, com base na NBR 5739 (ABNT, 2018).



**Figura 33 - Equipamento e ensaio de resistência à compressão axial**  
Fonte: Autor (2020)

### 3.3.3. Módulo de Elasticidade Estático

O ensaio de módulo de elasticidade estático foi realizado com base no Método A da NBR 8522 (ABNT, 2017). Primeiramente foi realizado o ensaio de resistência à compressão em dois corpos de prova, conforme item 3.3.2, para que fosse determinada a média do carregamento a ser aplicado no ensaio estático (30% da resistência do concreto). O deslocamento foi obtido por meio de dois extensômetros de tipo *clip gage*, com 100 mm de comprimento, fixados centralmente no corpo de prova de concreto (ver Figura 7 do item 2.1.1). Após realizada a medição do deslocamento, o Módulo de Elasticidade ( $E_{ci}$ ) foi calculado conforme a Equação 2 mostrada no Capítulo 2.

### 3.3.4. Módulo de Elasticidade Dinâmico

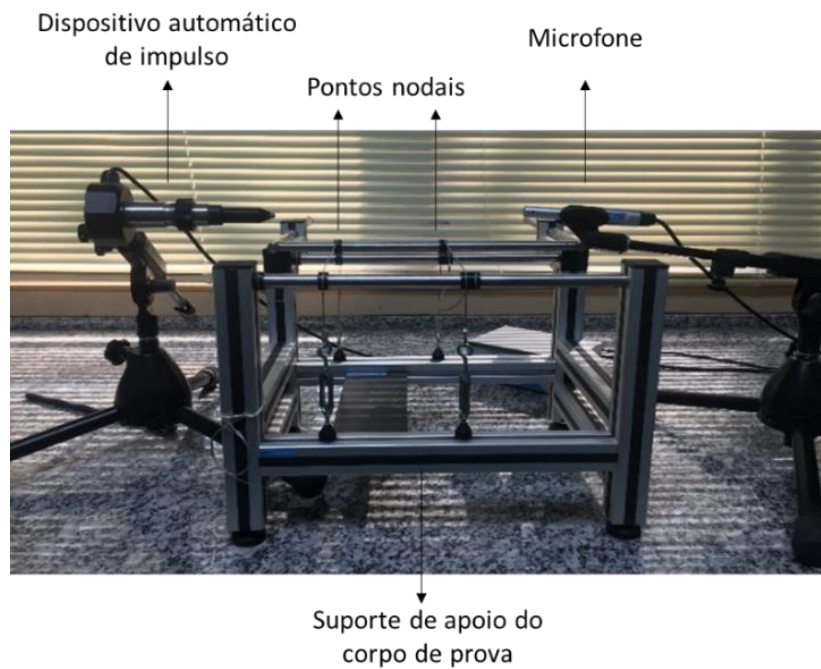
O MED foi mensurado por dois procedimentos distintos: técnica por excitação por impulso (TEI) e pela velocidade de pulso ultrassônico, conforme procedimentos descritos a seguir.

#### 3.3.4.1. Técnica de Excitação por Impulso

O ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de Excitação por Impulso (TEI) foi realizado com o equipamento e software *Sonelastic*® da marca ATCP Engenharia Física, nas configurações longitudinal e flexional.

Para a realização do ensaio, primeiramente, foi inserido no software do equipamento a massa e o comprimento do corpo de prova. Em seguida, a amostra foi apoiada nos pontos nodais a uma distância de  $0,224 \cdot L$  das extremidades do corpo de prova (sendo  $L$  o comprimento do mesmo). Assim que posicionado corretamente, o microfone foi posto aproximadamente à 1 cm da face do corpo de prova para a análise da resposta acústica, e o pulsador automático foi posicionado à uma distância de 3 milímetros do local do impacto.

Na Figura 10, do item 2.2.1, tem-se a posição dos equipamentos para a realização da medida longitudinal e flexional, na Figura 34 é mostrado o suporte com os dispositivos de captação de som e pulsação e na Figura 35 o ensaio com o equipamento e o corpo de prova.



**Figura 34 - Suporte de amostra com os dispositivos de captação de som e pulsação para afeição do MED pela Técnica de Excitação por Impulso**

**Fonte: Autor (2020)**



**Figura 35 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pela Técnica de Excitação por Impulso**

**Fonte: Autor (2020)**

Assim que o impacto no corpo de prova é realizado, as frequências de vibração do material em análise (resposta acústica) são capturadas por um microfone, as quais são processadas por um programa computacional baseado na transformada rápida de Fourier e, em seguida, o valor do módulo de elasticidade dinâmico da amostra ensaiada é averiguado.

### 3.3.4.2. Velocidade de Pulso Ultrassônico

Foi empregado, no ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico, o aparelho *Ultracon-170* (Figura 36), marca ATCP Engenharia Física, e a medição deu-se de forma longitudinal no corpo de prova, a fim de que haja captação pelos transdutores de forma direta.

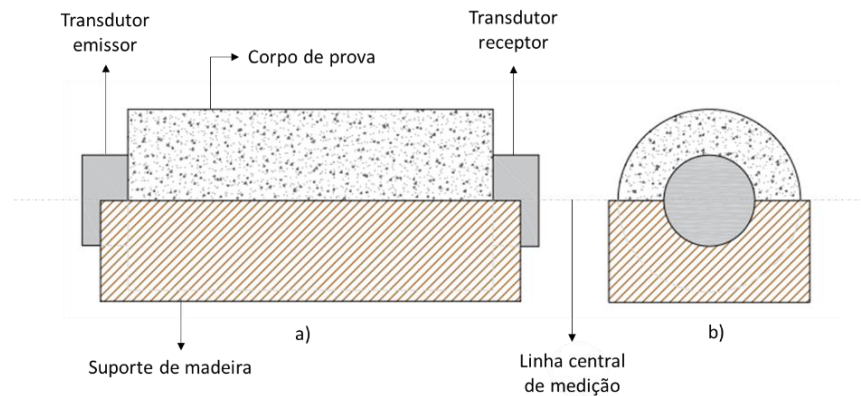


**Figura 36 - Equipamento Ultracon-170 para medição do  $E_d$  pelo método de Velocidade de Pulso Ultrassônico**

**Fonte: Autor (2020)**

Antes de iniciar ao procedimento, o equipamento foi calibrado a partir de uma amostra de referência de 10 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro com tempo de propagação de pulso ultrassônico de  $36,2 \pm 0,5 \mu\text{S}$ . Quando o valor mostrado no equipamento não estava de acordo com a referência, o valor foi ajustado manualmente por meio das setas de indicação do aparelho.

Após a calibração, foi ajustada a tensão do pulso de excitação adequada para testes em concreto (1200V), a frequência de repetição do pulso ideal para qualquer tipo de material (5Hz) e, em seguida, foi inserida a medida do comprimento do corpo de prova. Uma vez ajustado o equipamento, o corpo de prova foi disposto em um suporte de madeira fabricado especialmente para o ensaio (Figura 37) para que não houvesse excentricidade na medição do pulso ultrassônico entre os transdutores.



**Figura 37 - Projeto de suporte para corpo de prova cilíndrico para efetuar a medição pelo método de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU): a) Vista frontal e b) Vista lateral**

**Fonte: Autor (2020)**

Foi aplicado um elemento acoplante (graxa branca) na superfície dos transdutores, para facilitar a propagação das ondas ultrassônicas, e em seguida foram posicionados centralizados nas faces longitudinais do corpo de prova (Figura 38).



**Figura 38 - Arranjo do corpo de prova de concreto no suporte para a medição do  $E_{d,VPU}$**

**Fonte: Autor (2020)**

O pulso ultrassônico foi propagado através do concreto e o equipamento forneceu a velocidade e o tempo de propagação do pulso ultrassônico. Com essas informações obtidas, foi utilizada a Equação 30, demonstrada no Item 2.2.2, para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico.

### 3.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios foram tratados estatisticamente por meio dos softwares SigmaPlot® e Excel®. Para a análise universal, foi aplicada a estatística descritiva (média, desvio padrão, máximos e mínimos). Para comparar a variação de resultados em diferentes grupos foi utilizada a ferramenta gráfica boxplot e, para verificar a variância dos resultados, foi aplicada a ANOVA entre os grupos.

Na comparação individual dos resultados da ANOVA, foi utilizado o teste de Holm-Sidak. Para a avaliação de amostras independentes, foi utilizado o Teste U de Mann-Whitney (versão da rotina de teste não-paramétrico de t-Student). Ainda, foi realizada a análise de correlação pelo método de Pearson para averiguar o grau de relacionamento entre as variáveis e a análise de regressão linear e não linear de modo a se obter uma equação que descreva o comportamento entre essas variáveis. A partir da verificação dos erros, também foi possível realizar um levantamento dos pesos de cada fator de influência. Com o resultado obtido foi realizado um estudo comparativo com as equações propostas na literatura.

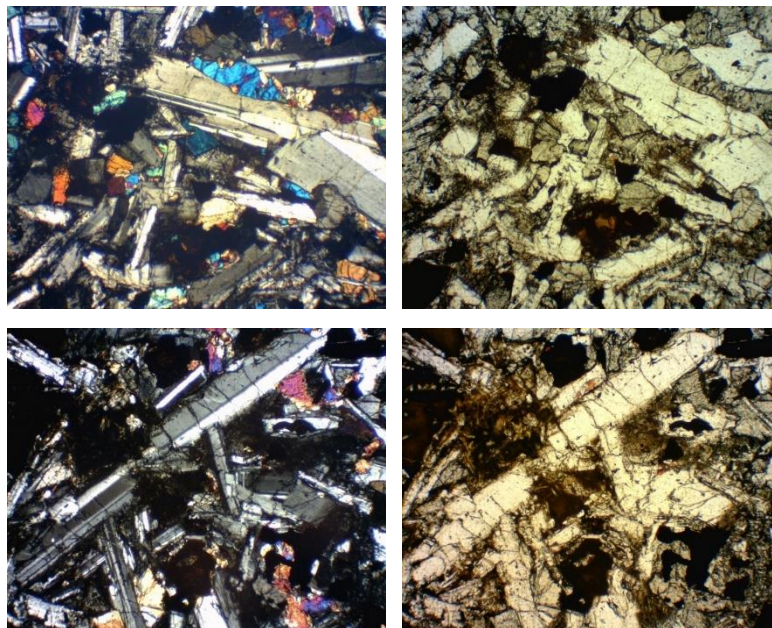


## 4. RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO

#### 4.1.1. Análise Petrográfica

A assembleia mineral de Foz do Iguaçu-PR (Figura 39) é formada basicamente por plagioclásio, piroxênio e opacos e vidro vulcânico e olivinas alteradas. O piroxênio provavelmente é uma augita e os opacos magnetitas. A estrutura da rocha é maciça e com minerais de tamanhos diversos (textura inequigranular, porfirítica) e granulometria variando entre média a grossa. A grande maioria dos cristais de plagioclásio possuem, um formato tabular (ou ripiforme) típico, porém também estão presentes formas anédricas.

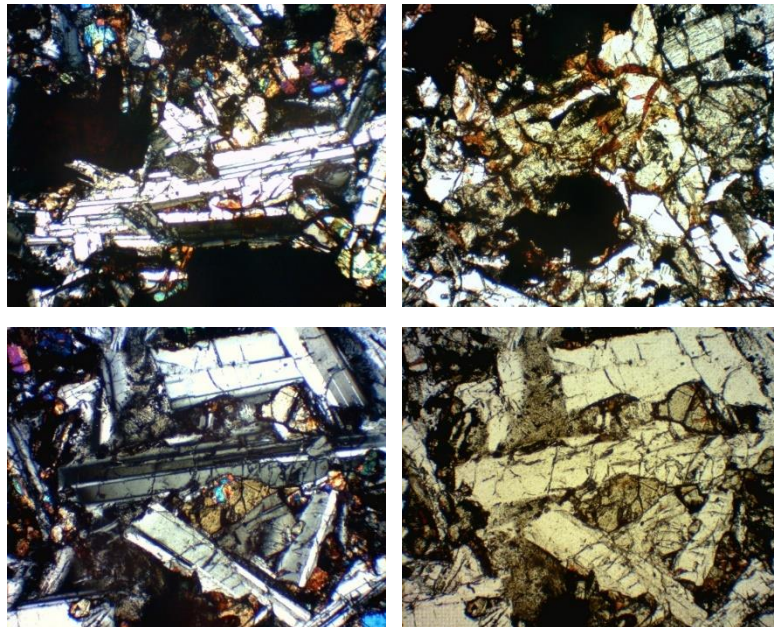


**Figura 39 - Fotomicrografia de lâmina petrográfica: Foz do Iguaçu-PR**  
**Fonte: Autor (2020)**

Há dois tamanhos predominantes de plagioclásios, o que dá a noção de matriz mais fina com fenocristais disseminados em toda a área representada pela lâmina. Os demais minerais, piroxênios, opacos e olivina são anédricos (não possuem faces de crescimento cristalino típicas e sim, faces irregulares) em sua maioria. Também foi observada a presença de vidro vulcânico. Apesar do baixo grau de alteração visualizado nas amostras de mão, pode-se observar evidências de alteração na lâmina.

Alguns cristais de plagioclásio apresentam feições de alteração nas bordas, possivelmente trata-se de sericitização, ou seja, alteração hidrotermal para sericita. A microfisuração, que é um dos primeiros estágios da alteração de alguns minerais, está presente, de forma heterogênea, em toda a área representada pela lâmina. O desenvolvimento da microfraturação de minerais, que inicia com o que visualmente pode ser identificado como uma linha fina, evolui para um traço mais marcado, depois para microfraturamentos associados e em várias direções, depois para início da separação dos fragmentos dos minerais, arredondamento das bordas finalizando na completa separação dos fragmentos. A alteração com formação de novo material, também faz parte desse processo de microfraturamento. Nos cristais de piroxênio as fraturas geralmente estão abertas, enquanto nos cristais de plagioclásio, boa parte das fraturas encontram-se preenchidas por sericita.

A assembleia mineral de Toledo-PR (Figura 40) é dada por plagioclásio, piroxênio, olivinas anfibólios, opacos e vidro. Apresenta estrutura maciça e textura inequigranular média a grossa, que visualmente pode ser um pouco mais grossa que a lâmina de amostra proveniente de Foz do Iguaçu-PR.



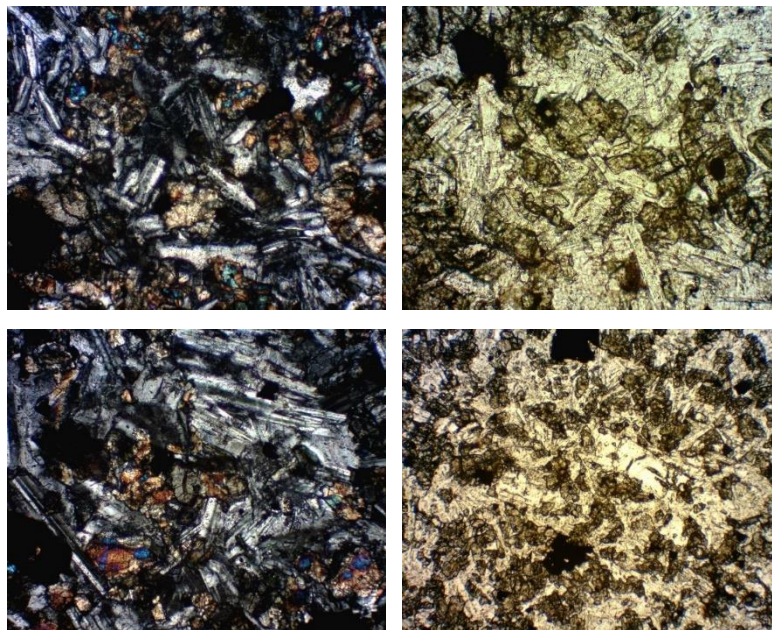
**Figura 40 - Fotomicrografia de lâmina petrográfica: Toledo-PR**

**Fonte: Autor (2020)**

Os cristais de plagioclásio possuem em sua maioria o formato tabular, no entanto, há presença de cristais de plagioclásio anédricos. Os cristais de piroxênio em sua

maioria são anédricos no entanto há cristais tabulares. Os cristais opacos são anédricos. Há presença de alteração na lâmina, onde alguns cristais de plagioclásio se encontram sob o efeito de sericitização, há também presença de ferruginização, no entanto, essa alteração está presente tanto nos piroxênios quanto nos plagioclásios. Apesar de apresentar microfissuração em toda sua extensão, a lâmina apresenta microfissuração mais acentuada em alguns pontos, predominando fraturamento intracristalino. A maioria das fraturas encontra-se aberta, no entanto, há algumas fraturas nos plagioclásios preenchidas por sericita.

A assembleia mineral de Guarapuava-PR (Figura 41) é dada por plagioclásio, piroxênio e opacos. Apresenta estrutura maciça com textura inequigranular. Os cristais de plagioclásio possuem um formato tabular em sua maioria, já os cristais de piroxênio e opacos são anédricos.



**Figura 41 - Fotomicrografia de lâmina petrográfica: Guarapuava-PR**  
**Fonte: Autor (2020)**

Há presença de alteração por toda a lâmina, onde os cristais de plagioclásio se encontram sob o efeito de sericitização, há também presença de ferruginização que está alterando tanto os piroxênios quanto os plagioclásios. Das três amostras apresentadas, a de Guarapuava é a que menos apresenta microfissuramento, sendo difícil a visualização dessas feições. Junto com a amostra de Toledo, é o grupo que apresenta o maior grau de alteração.

#### 4.1.2. FRX

Os resultados de Florescência de Raio-X (FRX) para cada local de extração das rochas estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Resultados de FRX**

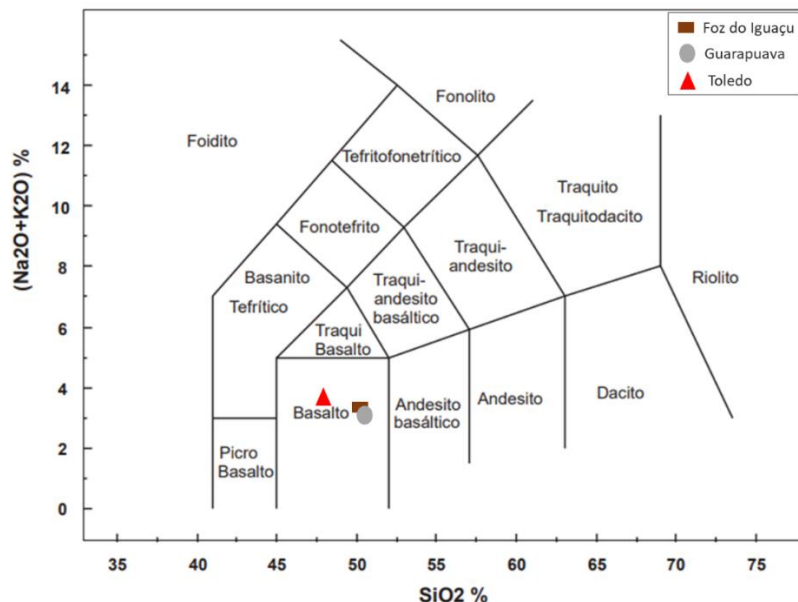
Amostra	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	MnO (%)	SrO (%)	ZnO (%)	ZrO <sub>2</sub> (%)	CuO (%)	P.F (%)
Foz do Iguaçu-PR	50,00	16,00	14,00	9,70	3,80	2,40	1,60	1,00	0,40	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,70
Guarapuava-PR	50,30	15,50	13,90	10,60	4,20	2,40	1,00	0,80	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	0,78
Toledo-PR	48,70	15,10	14,70	9,80	4,30	2,40	1,40	1,10	0,30	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	1,81

P.F: Ponto do fogo

\*Resultados normalizados para 100%

Fonte: Autor (2020)

Por meio da porcentagem de peso de sílica (SiO<sub>2</sub>) e do peso de álcalis (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>), foi possível verificar no diagrama de Zanettin (1984) e Le Bas *et al.* (1986) (Figura 42), de rochas vulcânicas básicas, que as amostras analisadas se comportam quimicamente como basalto. As amostras variam o teor de sílica entre 48,70% e 50,30% e os álcalis entre 3,20% e 3,50%.



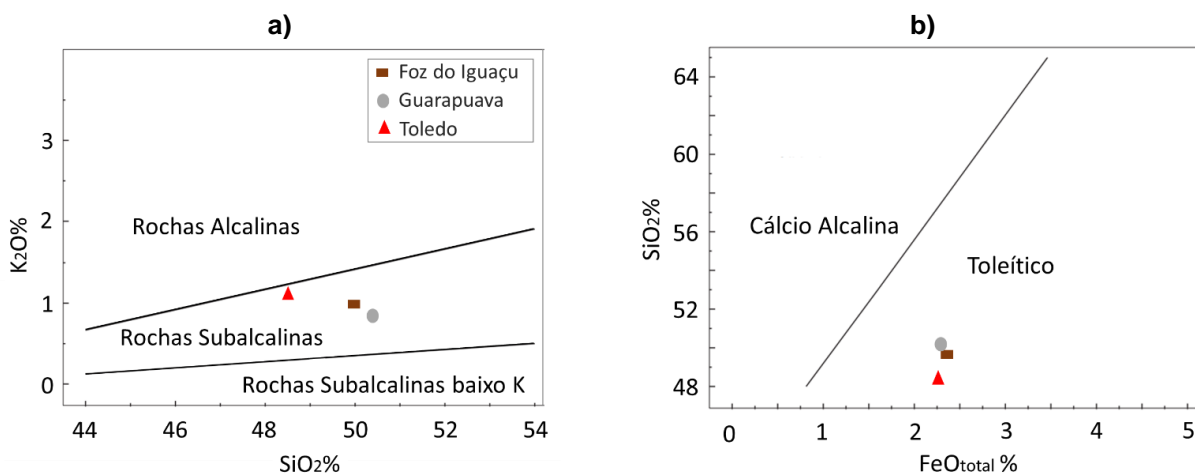
**Figura 42 - Diagrama SiO<sub>2</sub> vs. Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O de Zanettin (1984) e Le Bas *et al.* (1986)**

Fonte: Autor (2020)

Comparando o peso de sílica (SiO<sub>2</sub>) com o óxido de potássio (K<sub>2</sub>O), é possível verificar pelo diagrama binário de Middlemost (1975) (Figura 43-a) que as

amostras de rochas são consideradas sub-alcálicas. Dentre elas, a rocha extraída de Toledo obteve maior concentração de óxido de potássio (1,10%), seguido de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR com 1,00% e 0,80%, respectivamente.

O elevado valor de  $K_2O$  da amostra de Toledo-PR junto com baixo teor de  $SiO_2$  (48,70%), fez com que ela estivesse entre a classificação alcalina e subalcalina. Quando verificado o óxido ferroso (FeO) por meio da relação com o óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ) no diagrama binário de Miyashiro (1974) (Figura 43-b), todas as amostras foram classificadas como toleíticas.



**Figura 43 - a) Diagrama binário  $SiO_2$  vs.  $K_2O$  de Middlemost (1975)**

**b) Diagrama binário  $FeO_{total}$  vs.  $SiO_2$  de Miyashiro (1974)**

Fonte: Autor (2020)

#### 4.1.3. Ensaio de Esmagamento, Índice de Carga Pontual e Módulo de Elasticidade

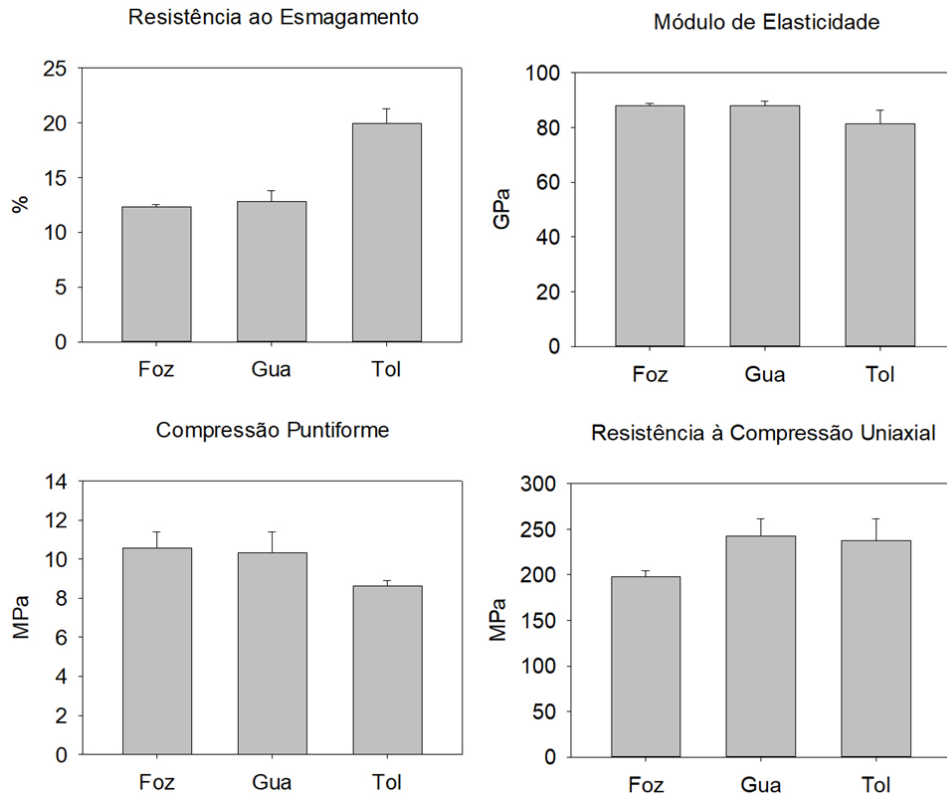
Na Tabela 17 são apresentadas a média e o desvio padrão dos resultados de resistência ao esmagamento ( $R$ ), de compressão puntiforme ( $I_{s50}$ ), da estimativa da resistência à compressão uniaxial (RCU) e do módulo de elasticidade ( $E_d$ ).

**Tabela 17 - Resultados de resistência ao esmagamento, compressão puntiforme, estimativa da resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade**

Origem Mineralógica	$R$ (%)	$\sigma$ (%)	$I_{s50}$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	RCU (MPa)	$\sigma$ (MPa)	$E_d$ (GPa)	$\sigma$ (GPa)
Foz do Iguaçu-PR	12,30	0,23	10,56	0,82	243,00	24,15	88,06	0,41
Guarapuava-PR	12,83	0,99	10,34	1,05	237,77	18,78	88,01	1,08
Toledo-PR	19,97	1,32	8,61	0,28	197,95	6,52	81,38	1,54

$R$ : Resistência ao esmagamento;  $I_{s50}$ : Índice de carga pontual; RCU: Resistência à compressão uniaxial;  $E_d$ : Módulo de elasticidade;  $\sigma$ : Desvio padrão

Fonte: Autor (2020)



**Figura 44 - Resultados de resistência ao esmagamento ( $R$ ), módulo de elasticidade ( $E$ ), compressão puntiforme ( $Is50$ ) e resistência à compressão uniaxial ( $RCU$ )**

**Fonte: Autor (2020)**

Todos os resultados de resistência ao esmagamento (%) estão dentro do limite recomendado pela norma SANS 1083 (2014) que limita à 29% o valor da resistência para agregados para concreto. O basalto oriundo de Toledo-PR teve valores mais expressivos (19,97%) do que a rocha de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR (12,30% e 12,83%, respectivamente), o que indica que sua resistência é menor em relação às outras jazidas (quanto maior o indicador, menor resistência é o material).

Quanto aos resultados do ensaio de índice de carga pontual, eles indicam que os basaltos provenientes de Toledo-PR estão, na classificação de Broch & Franklin (1972), com resistência muito alta e Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR são classificados como extremamente alta. Quanto ao módulo de elasticidade, o valor médio do basalto de Toledo-PR é aproximadamente 7 GPa inferior à Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR.

Quando comparado os resultados mecânicos com a análise visual e o ensaio de absorção, é visto que essa diferença entre os basaltos de Toledo-PR, Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR é ocasionada pela porosidade no agregado. Contudo, ainda que exista essa diferença entre elas, todas as rochas têm bom desempenho para o uso em concreto.

## 4.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

Na Figura 45 (Página 71) é mostrado os resultados médios dos módulos de elasticidade estático e dinâmico em função do aumento da relação água/cimento (a/c) e do teor de agregado graúdo ( $\beta$ ) dos concretos produzidos e, na Tabela 18, é apresentada a análise de variância para cada fator de influência e método de medição.

**Tabela 18 - ANOVA - Influência do agregado graúdo, teor de argamassa e relação água/cimento no módulo de elasticidade do concreto**

Método de Medição	Matriz de Variação	GDL	SQ	MQ	F	p-valor	Significância
$E_{d,VP}$	Agregado	2	415,988	207,994	219,519	<0,001	Sim
	Teor de Agregado	3	1010,833	336,944	355,613	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	504,42	252,21	266,184	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado	6	184,731	30,788	32,494	<0,001	Sim
	Agregado x Relação a/c	4	20,151	5,038	5,317	<0,001	Sim
	Teor de Agregado x Relação a/c	6	76,893	12,816	13,526	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado x Relação a/c	12	92,652	7,721	8,149	<0,001	Sim
	Residual	180	170,55	0,948			
Total	215	2476,219	11,517				
$E_{d,TEI}$ Longitudinal	Agregado	2	384,594	192,297	314,455	<0,001	Sim
	Teor de Agregado	3	267,638	89,213	145,886	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	463,492	231,746	378,965	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado	6	235,703	39,284	64,239	<0,001	Sim
	Agregado x Relação a/c	4	34,053	8,513	13,921	<0,001	Sim
	Teor de Agregado x Relação a/c	6	34,728	5,788	9,465	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado x Relação a/c	12	30,385	2,532	4,141	<0,001	Sim
	Residual	180	110,074	0,612			
Total	215	1560,667	7,259				
$E_{d,TEI}$ Flexional	Agregado	2	338,881	169,441	151,06	<0,001	Sim
	Teor de Agregado	3	386,532	128,844	114,867	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	484,711	242,355	216,065	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado	6	191,236	31,873	28,415	<0,001	Sim
	Agregado x Relação a/c	4	39,561	9,89	8,817	<0,001	Sim
	Teor de Agregado x Relação a/c	6	34,369	5,728	5,107	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado x Relação a/c	12	29,01	2,418	2,155	0,016	Sim
	Residual	180	201,902	1,122			
Total	215	1706,201	7,936				
$E_c$	Agregado	2	1039,805	519,903	303,455	<0,001	Sim
	Teor de Agregado	3	36,234	12,078	7,05	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	185,915	92,958	54,257	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado	6	231,092	38,515	22,481	<0,001	Sim
	Agregado x Relação a/c	4	50,498	12,625	7,369	<0,001	Sim
	Teor de Agregado x Relação a/c	6	48,441	8,073	4,712	<0,001	Sim
	Agregado x Teor de Agregado x Relação a/c	12	31,049	2,587	1,51	0,14	Não
	Residual	72	123,356	1,713			
Total	107	1746,39	16,321				

GDL: Graus de liberdade; SQ: Soma dos quadrados; MQ: Média quadrática. F: MQm/MQr

Fonte: Autor (2020)

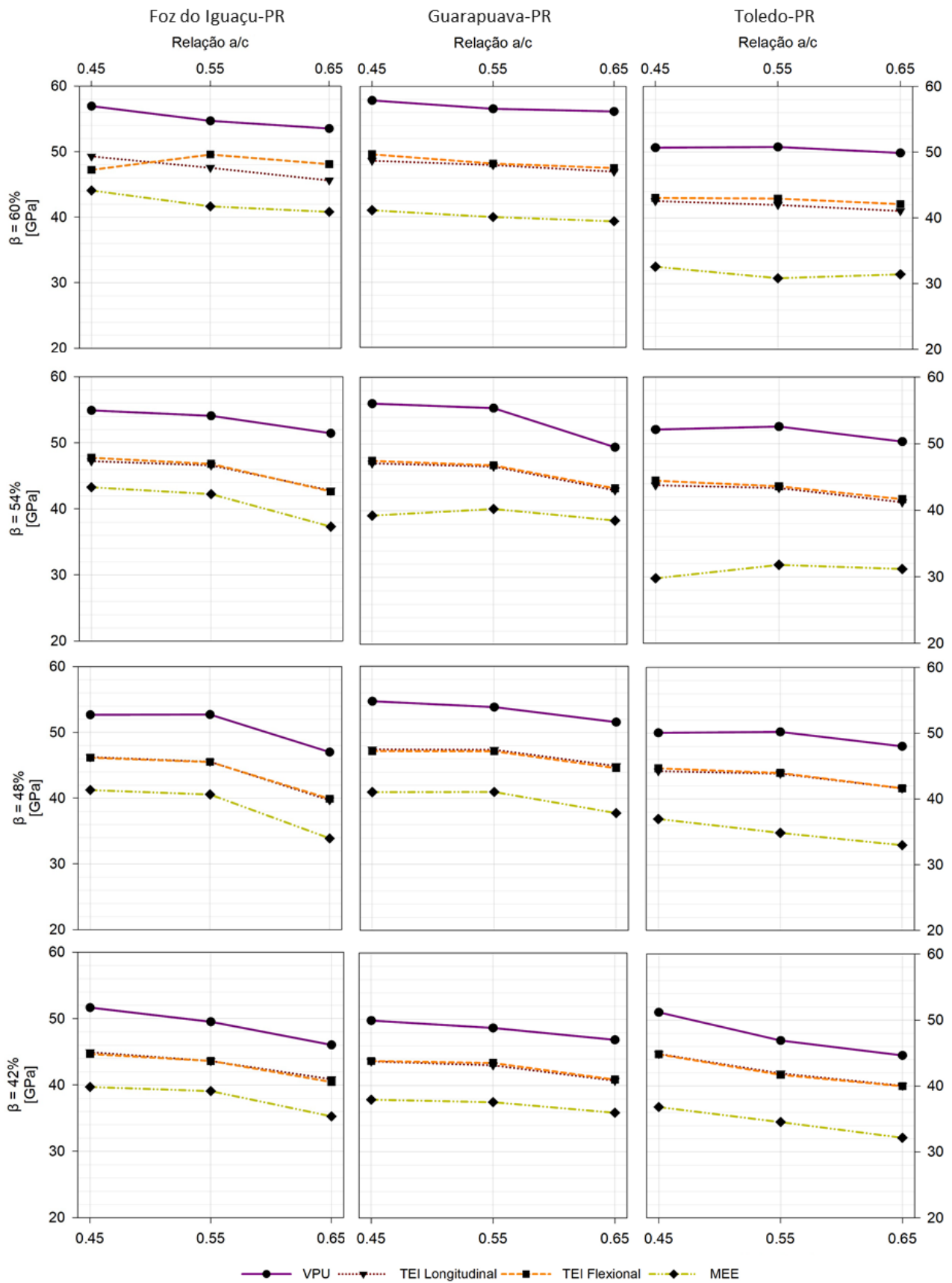


Figura 45 - Relações entre os métodos de medição, teor de agregado graúdo, relação água/cimento e tipo de agregado graúdo no módulo de elasticidade estático e dinâmico

Fonte: Autor (2020)



#### 4.2.1. Influência da Relação Água/Cimento

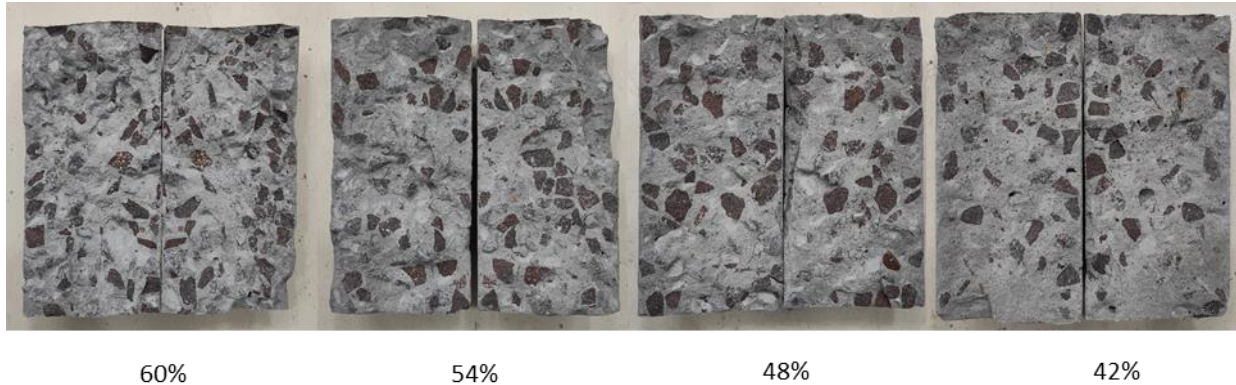
Dentre as relações água/cimento analisadas, foi possível averiguar que, de modo geral, houve variação significativa nos valores de módulo de elasticidade. A relação a/c de 0,45 teve os maiores resultados, seguidos de 0,55 e 0,65. Quanto a variação entre os resultados, a maior ocorreu entre as relações 0,45 e 0,65 com média de 7,3% de diferença. Em termos de valor de módulo, a média dos valores entre as relações a/c foi de aproximadamente 3,35 GPa.

Em outros trabalhos, como de Musiał e Grosel (2016), Wen *et al.* (2016) e Lee *et al.* (2017), também é possível verificar que conforme há o aumento da relação água/cimento, há a redução do valor do módulo de elasticidade do concreto. Esta variação de valores consiste no fato de o módulo de elasticidade ser diretamente influenciado pelas propriedades da matriz da pasta de cimento (MEHTA e MONTEIRO, 2013). Conforme há o aumento do teor de água na mistura, eleva-se a porosidade do concreto, tornando-o menos rígido e, conseqüentemente, há a diminuição do valor do módulo (NEVILLE, 2016).

Em termos de volume de material, o aumento da relação água/cimento resulta em uma diminuição do volume de cimento na mistura. Com essa redução, é necessário aumentar o volume dos materiais remanescentes, o que de forma indireta continua influenciando no comportamento do módulo de elasticidade do concreto, havendo uma sobreposição de efeitos intervenientes. Dessa maneira, nos itens a seguir, será discutida a influência do agregado graúdo no concreto.

#### 4.2.2. Influência do Teor e Tipo de Agregado Graúdo

A variação da quantidade de agregado graúdo ( $\beta$ ) (Figura 46) utilizada no experimento provocou mudanças no valor do módulo de elasticidade do concreto. Corpos de prova com maior volume de agregado (60%), na sua grande maioria, tiveram maiores valores de módulo de elasticidade quando comparado aos concretos com menor teor de agregado (42%). A média da variação dos resultados entre os teores de agregado citados foi de 4,38 GPa, representando uma diferença de aproximadamente 9,28%. No estudo de Nikbin *et al.* (2014), foi constatado um aumento no módulo de elasticidade em torno de 17% para concretos com 60% de agregado graúdo, quando comparado a concretos com 30%.



**Figura 46 - Variação da quantidade de agregado graúdo ( $\beta$ ) utilizada em amostras de concreto contendo basalto de Toledo-PR**

**Fonte: Autor (2020)**

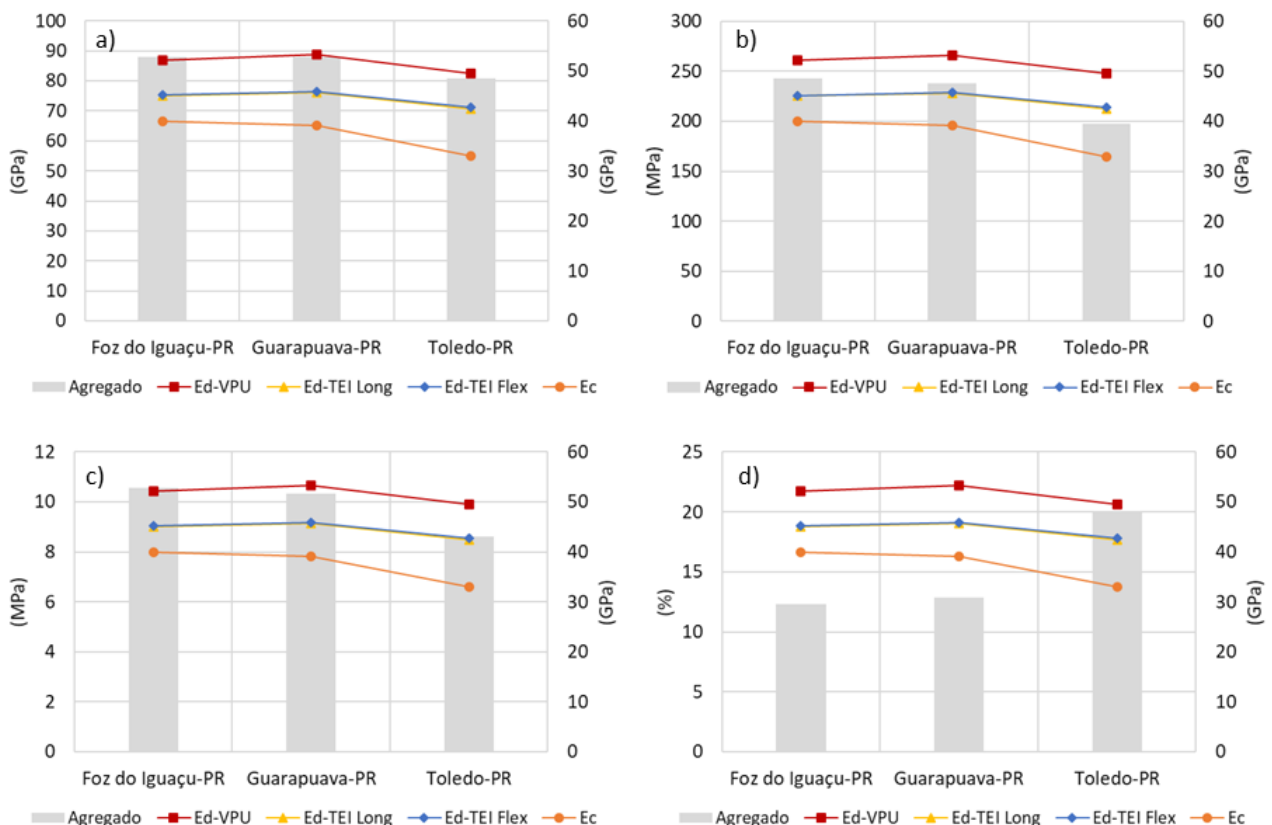
A origem/fonte do agregado graúdo teve influência mais expressiva no módulo de elasticidade do que os outros fatores analisados (relação água/cimento e teor de agregado graúdo). O concreto com o basalto de Toledo-PR teve resultados de módulo de elasticidade menores do que os concretos com o basalto de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR.

O motivo está atrelado as propriedades microestruturais das rochas. Conforme analisado anteriormente, o basalto proveniente de Toledo-PR é mais poroso e isso afeta diretamente suas propriedades mecânicas, tornando-o menos resistente ao esmagamento e com menor módulo de elasticidade (Figura 47). Essas características contribuíram para a redução do módulo de elasticidade dos concretos produzidos com esta rocha. Nos trabalhos de Lizarazo-Marriaga e Yépez (2011) e Lu *et al.* (2013) é possível verificar que os parâmetros físicos influenciam de forma direta no módulo de elasticidade, principalmente quando os agregados são de origem distinta.

Quando realizada a análise considerando a relação água/cimento e teor de argamassa constantes para cada agregado, o módulo de elasticidade dos concretos com basalto de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR tiveram pouca variação entre si, mas quando comparado a Toledo, houve variação de resultados de até 13,51 GPa, equivalente a aproximadamente 30% de diferença. Agregados com origem mineralógica distinta (gnaisse, calcário, entre outras) podem ter resultados de módulo de elasticidade ainda mais divergentes entre si, conforme estudados por Lopes *et al.* (2017).

Neste caso, é importante ressaltar que da mesma maneira que o agregado graúdo pode auxiliar no aumento do módulo de elasticidade com o aumento da sua quantidade na composição do concreto, as suas características mineralógicas podem

também provocar a diminuição ou manter constante seu valor (Zhou *et al.*, 2015) (Piasta *et al.*, 2017) (Jurowski e Grzeszczyk, 2018), sendo de importância a realização de ensaios de caracterização da rocha para compreender as propriedades que irão nortear o módulo de elasticidade do concreto. Na Figura 47 é realizada a relação entre os valores médios do módulo de elasticidade do concreto e os valores das propriedades mecânicas do agregado graúdo.



**Figura 47 - Relação entre o módulo de elasticidade do concreto e a) o módulo de elasticidade do agregado; b) a resistência à compressão uniaxial; c) o índice de carga pontual; d) a resistência ao esmagamento**

Fonte: Autor (2020)

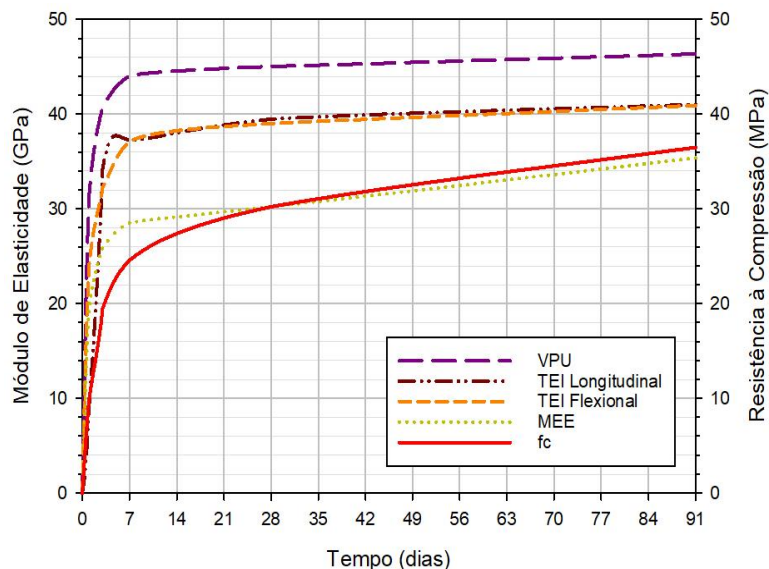
Algumas hipóteses foram formuladas quanto aos fenômenos envolvidos na interação dos agregados porosos e a matriz do concreto. Embora a retenção de umidade pelo agregado pudesse até favorecer a hidratação do cimento em sua interface, a própria umidade (ou abundância da água) na interface cimento-agregado poderia dificultar a definição de uma interface mais forte, que conecte cimento ao agregado. Localmente, na interface entre agregado e argamassa, a relação água/cimento pode se tornar maior.

Inclusive, percebe-se que o módulo de elasticidade do concreto (como um todo) em função da relação água/cimento apenas se apresenta de modo

coerente a partir de teores de agregados baixos (ou teores de argamassa elevados). Em outras palavras, o concreto passa a apresentar tendências semelhantes aos demais (agregados de outras localidades) porque a influência das propriedades mecânicas da argamassa torna-se mais significativa. Em outras palavras, a influência dessa interface porosa com agregados torna-se menor, pelo simples fato de existirem menos agregados.

#### 4.2.3. Influência do Tempo

Nas idades iniciais<sup>22</sup> do concreto há um aumento no valor do módulo de elasticidade estático e dinâmico. Esse aumento ocorre até o sétimo dia e, a partir desse instante, começa o processo de estabilização do valor, conforme mostrado na Figura 48.



**Figura 48 - Influência do tempo no módulo de elasticidade do concreto**  
Fonte: Autor (2020)

Este aumento progressivo do módulo nas primeiras idades do concreto ocorre por conta desenvolvimento das reações de hidratação do cimento, responsáveis pelo ganho da resistência mecânica. O cimento utilizado, CP-V ARI, devido sua maior área específica, é indicado para alcançar resistências<sup>23</sup> mais elevadas nas idades iniciais, o que, conseqüentemente, afeta a rigidez do concreto.

<sup>22</sup> Estudo dos concretos moldados com cimento: CP-V ARI; basalto de Toledo-PR, teor de agregado graúdo: 48%; e relação água/cimento: 0,65.

<sup>23</sup> Neste estudo, a média da diferença entre o resultado de resistência do terceiro ao sétimo dia foi de 5,10 MPa, enquanto do sétimo ao vigésimo oitavo dia é aproximadamente 5,63 MPa. Isso indica que a taxa de ganho de resistência a partir do sétimo dia é baixa se comparada as idades anteriores.

Para verificar estatisticamente a influência do tempo no módulo, foi realizada a análise de variância, apresentada na Tabela 19.

**Tabela 19 - ANOVA – Variação do módulo de elasticidade no tempo**

Matriz de Variação	GDL	SQ	MQ	F	P	Significância
Método de Ensaio	3	2032,647	677,549	879,137	<0,001	Sim
Idade	4	4162,14	1040,535	1350,12	<0,001	Sim
Método de Ensaio x Idade	12	815,215	67,935	88,147	<0,001	Sim
Residual	70	53,949	0,771			
Total	89	7555,975	84,899			

GDL: Graus de liberdade; SQ: Soma dos quadrados; MQ: Média quadrática. F: MQm/MQr

Fonte: Autor (2020)

Para todos os métodos de medição realizados, houve variação significativa no valor do módulo de elasticidade no tempo, salvo exceção para o método VPU entre as idades de 7 e 28 dias. Contudo, como é dado início o processo de estabilização da curva do módulo de elasticidade em função do tempo a partir do sétimo dia, foi realizado um estudo mais detalhado com o agregado basáltico de Foz do Iguaçu-PR, teor de agregado: 60%, 54%, 48% e 42%; e relação água/cimento: 0,45, 0,55 e 0,65 para fim de comparação com a idade de 28 dias. Os valores da análise de variância estão mostrados na Tabela 20.

**Tabela 20 - ANOVA – Módulo de elasticidade estático e dinâmico aos 7 e 28 dias**

Método de Ensaio	Matriz de Variação	GDL	SQ	MQ	F	p-valor	Significância
E <sub>d,VPU</sub>	Teor de Argamassa	3	633,116	211,039	171,53	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	536,263	268,131	217,934	<0,001	Sim
	Tempo	1	178,534	178,534	145,11	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Relação a/c	6	72,512	12,085	9,823	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Tempo	3	18,685	6,228	5,062	0,002	Sim
	Relação a/c x Tempo	2	0,198	0,0988	0,0803	0,923	Não
	Teor de Argam. X Relação a/c x Tempo	6	5,446	0,908	0,738	0,62	Não
	Residual	120	147,64	1,23			
Total	143	1592,394	11,136				
E <sub>d,TEI Longitudinal</sub>	Teor de Argamassa	3	393,708	131,236	248,613	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	561,11	280,555	531,482	<0,001	Sim
	Tempo	1	207,288	207,288	392,685	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Relação a/c	6	83,685	13,948	26,422	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Tempo	3	2,857	0,952	1,804	0,15	Não
	Relação a/c x Tempo	2	0,527	0,263	0,499	0,609	Não
	Teor de Argamassa x Relação a/c x Tempo	6	4,696	0,783	1,483	0,19	Não
	Residual	120	63,345	0,528			
Total	143	1317,216	9,211				

Método de Ensaio	Matriz de Variação	GDL	SQ	MQ	F	p-valor	Significância
$E_{d,TEI}$ Flexional	Teor de Argamassa	3	534,312	178,104	140,952	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	634,507	317,254	251,076	<0,001	Sim
	Tempo	1	199,445	199,445	157,841	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Relação a/c	6	86,139	14,357	11,362	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Tempo	3	3,218	1,073	0,849	0,47	Não
	Relação a/c x Tempo	2	1,371	0,685	0,542	0,583	Não
	Teor de Argamassa x Relação a/c x Tempo	6	14,305	2,384	1,887	0,088	Não
	Residual	120	151,629	1,264			
	Total	143	1624,927	11,363			
$E_c$	Teor de Argamassa	3	181,005	60,335	34,544	<0,001	Sim
	Relação a/c	2	434,495	217,247	124,383	<0,001	Sim
	Tempo	1	215,973	215,973	123,654	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Relação a/c	6	58,284	9,714	5,562	<0,001	Sim
	Teor de Argamassa x Tempo	3	8,493	2,831	1,621	0,197	Não
	Relação a/c x Tempo	2	3,508	1,754	1,004	0,374	Não
	Teor de Argamassa x Relação a/c x Tempo	6	29,213	4,869	2,788	0,021	Sim
	Residual	48	83,837	1,747			
	Total	71	1014,809	14,293			

GDL: Graus de liberdade; SQ: Soma dos quadrados; MQ: Média quadrática. F: MQm/MQr

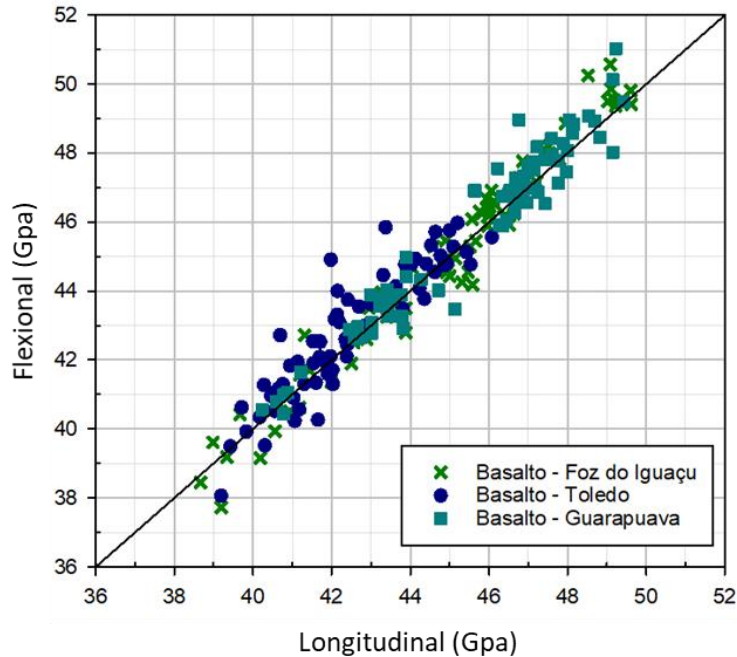
Fonte: Autor (2020)

Estatisticamente, os resultados indicam que há variação significativa entre os dias 7 e 28 dias. Contudo, em termos de valores brutos, a média de acréscimo no valor do módulo de elasticidade entre as idades foi somente de 2,24 GPa, 2,32 GPa, 2,22 GPa e 3,67 GPa para  $E_{d,VPU}$ ,  $E_{d,TEI}$  Londitudinal,  $E_{d,TEI}$  Flexional e  $E_c$ , respectivamente, não sendo uma variação significativa na engenharia estrutural.

#### 4.3. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO DO CONCRETO

##### 4.3.1. Comparação entre a Vibração Longitudinal e Flexional pelo Método da Técnica de Excitação por Impulso (TEI)

Na Figura 49 é possível verificar a dispersão dos resultados do módulo de elasticidade do concreto através da vibração longitudinal e flexional, aos 28 dias, para os teores de agregado graúdo, relação água/cimento e os agregados basálticos de Foz do Iguaçu-PR, Guarapuava-PR e Toledo-PR.



**Figura 49 - Estudo comparativo do modo de vibração longitudinal e flexional pelo método TEI**  
**Fonte: Autor (2020)**

Conforme apresentado, os resultados do  $E_d$  aferido pelo modo de vibração longitudinal e flexional são de tal maneira semelhantes a ponto de a linha de tendência exposta no gráfico condizer com a hipótese de que os valores são iguais. Para verificar estatisticamente a comparação entre os grupos, na Tabela 21 é apresentado os valores do Teste U de Mann-Whitney.

**Tabela 21 - Teste U de Mann-Whitney e Pearson: Relação entre o modo longitudinal e flexional no TEI**

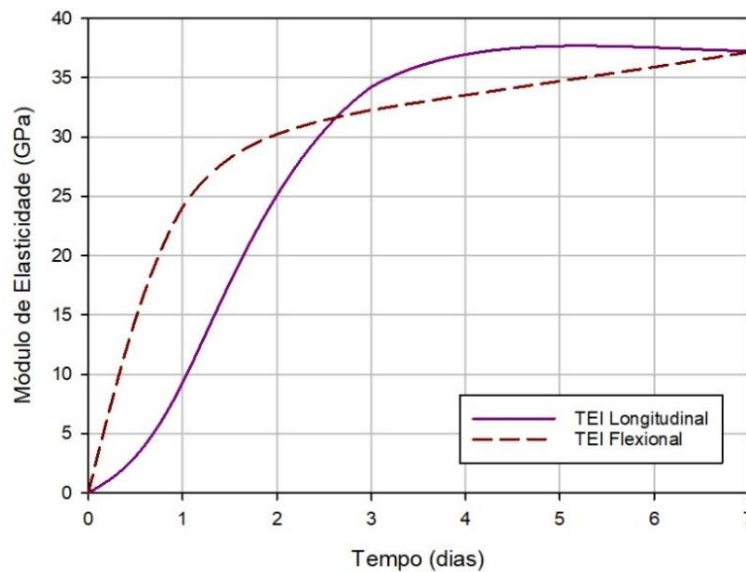
Teste U de Mann-Whitney e Teste de Correlação de Pearson					
Grupo	Nº de dados	Faltante	Mediana	25%	75%
Longitudinal	216	0	44,385	42,238	46,665
Flexional	216	0	44,555	42,63	46,81
Longitudinal X Flexional	Mann-Whitney = 22325,5		$p_{value} = 0,4040$		
Longitudinal X Flexional	Coeficiente de Correlação = 0,970		$p_{value} = 9,178.10^{-134}$		

**Fonte: Autor (2020)**

A diferença nos valores medianos entre os dois grupos não é grande o suficiente para excluir a possibilidade de que a diferença seja devida à variabilidade da amostra aleatória, sendo assim, não há diferença estatisticamente significativa ( $P = 0,440$ ). Quanto a análise pelo método Pearson, como o valor está abaixo de 0,05, logo as amostras tendem a ter a variabilidade do resultado de forma conjunta. Em termos de desvio padrão,

o valor médio variou de 0,25 a 0,50 GPa para o agregado de Foz do Iguaçu-PR, 0,24 e 0,74 GPa para o agregado de Toledo-PR e 0,20 a 0,70 GPa para o agregado de Guarapuava-PR

Quanto a variação dos modos vibracionais no tempo, não houve variação significativa entre o TEI Longitudinal e TEI Flexional entre os dias 7 e 91 dias de ensaio. Contudo, é possível notar uma discrepância (Figura 50) nos valores entre os modos de medição nas idades iniciais (até 7 dias).



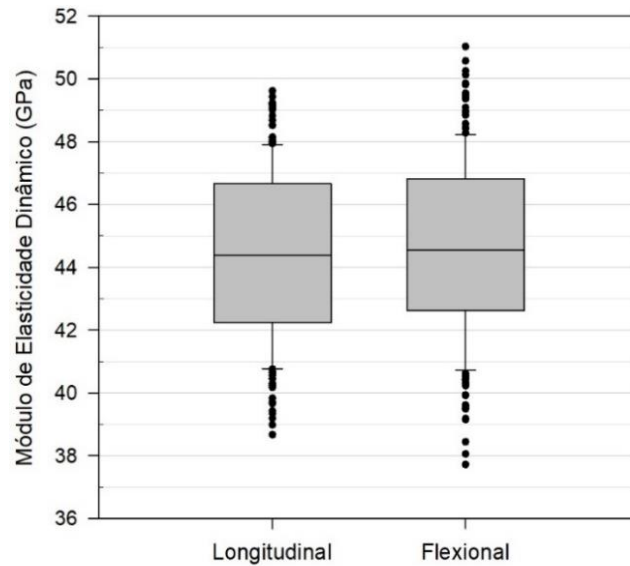
**Figura 50 - Diferença de resultados de módulo de elasticidade dinâmico por meio do modo Longitudinal e Flexional nas idades iniciais**

Fonte: Autor (2020)

A maior diferença ocorre no dia posterior à confecção dos corpos de prova, com uma diferença de aproximadamente 15 GPa. Dentre os modos vibracionais analisados, o flexional segue a mesma tendência dos outros métodos de medição (VPU e Estático), conforme mostrado na Figura 47, sendo assim recomenda-se o modo flexional para a aferição até a idade de 7 dias.

Já aos 28 dias, é possível utilizar ambos os modos de medição sem que haja interferência nos resultados. Contudo, no estudo foi possível observar que o modo longitudinal tem os menores valores de desvio padrão para a maioria das misturas de concreto (Figura 51).





**Figura 51 - Boxplot dos modos de vibração Longitudinal e Flexional para o TEI  
Autor (2020)**

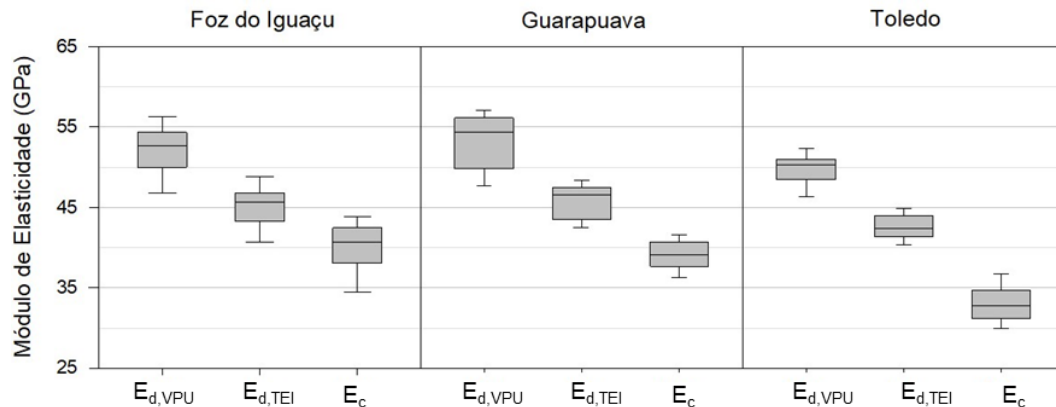
Enquanto para o modo Flexional o desvio padrão chegou, em alguns casos aproximadamente 1,50 GPa, o modo Longitudinal teve valores abaixo de 1,00 GPa. Essa diferença ocorre por conta das influências na medição para cada modo utilizado. Ainda que no modo Longitudinal o corpo de prova deve ser posicionado adequadamente conforme a instrução do fabricante, ele não influencia da mesma maneira que no modo flexional. Neste último, para que não haja interferência nos resultados do módulo, ele deve ser posto exatamente nos pontos nodais, ou seja, a uma distância de 22,4% do seu comprimento nas extremidades, conforme discutido no item 2.2.1. Outro fator é a posição do dispositivo de impulso e do microfone, que devem estar bem centralizados no corpo de prova para que haja a melhor captação de sinal de vibração.

Pelos motivos citados, nos próximos itens, o estudo comparativo entre os métodos de medição será realizado pelo modo vibracional Longitudinal no método TEI, já que este apresenta menor variabilidade dos resultados.

#### 4.3.2. Relação entre os Módulos de Elasticidade Dinâmico (TEI e VPU) e o Estático

Dentre os métodos utilizados neste estudo para a verificação do módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto, a velocidade do pulso ultrassônico (VPU) conduziu os valores mais elevados, enquanto o método estático conduziu os mais baixos.

Na Figura 52 é possível verificar a diferença da média dos resultados das misturas de concreto utilizado no projeto experimental para cada método.



**Figura 52 - Boxplot dos resultados do programa experimental de todas as misturas de concreto para cada método de ensaio aos 28 dias**

Fonte: Autor (2020)

A relação  $E_{d,VPU}/E_{d,TEI}$ ,  $E_{d,TEI}/E_c$  e  $E_{d,VPU}/E_c$  para todas as misturas foi, em média, 1,16, 1,20 e 1,39, respectivamente. Contudo, quando analisada a Figura 51, é perceptível que para o basalto de Toledo-PR a diferença entre o método estático para o demais agregados é maior. Na Tabela 22 é demonstrado as relações de forma individualizada para cada basalto.

**Tabela 22 - Média para cada relação de métodos de medição**

Origem Mineralógica	$E_{d,VPU}/E_{d,TEI}$ (GPa)	Média (GPa)	$E_{d,TEI}/E_c$ (GPa)	Média (GPa)	$E_{d,VPU}/E_c$ (GPa)	Média (GPa)
Foz do Iguaçu-PR	1,16		1,13		1,31	
Guarapuava-PR	1,17	1,17	1,17	1,20	1,36	1,39
Toledo-PR	1,17		1,29		1,51	

Fonte: Autor (2020)

Essa variação dos resultados entre os agregados está atrelada as propriedades mecânicas da rocha vista na seção de caracterização dos materiais. O basalto de Toledo-PR é menos resistente ao esmagamento quando comparado aos demais agregados e, levando em conta que o ensaio estático é realizado com a aplicação de uma tensão no corpo de prova de concreto, logo ele irá influenciar diretamente no valor do módulo de elasticidade medido (ver Figura 47-d).

Em relação ao tempo de ensaio, o estudo mostrou que os métodos não destrutivos são bem mais rápidos que o estático. Na Tabela 23 são apresentados os tempos

médios contabilizados para a realização de cada ensaio, com base no preparo e ensaio de três corpos de prova de concreto.

**Tabela 23 - Tempo médio de execução de cada ensaio de módulo de elasticidade para 3 corpos de prova de concreto**

Tipo de ensaio	Procedimento	Tempo
Preparação dos corpos de prova	Medição das dimensões e massa	00:02:38 h
Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)	Alocação do corpo de prova no suporte	00:06:35 h
	Acoplamento dos transdutores	
	Medição da velocidade do pulso ultrassônico	
Técnica de Excitação por Impulso (TEI)	Alocação do corpo de prova no suporte	00:06:36 h
	Impulso (mecânico ou automático)	
	Medição do módulo de elasticidade dinâmico	
Ensaio Estático	Acoplamento do medidor de deformação Ciclos de carregamento	00:58:38 h

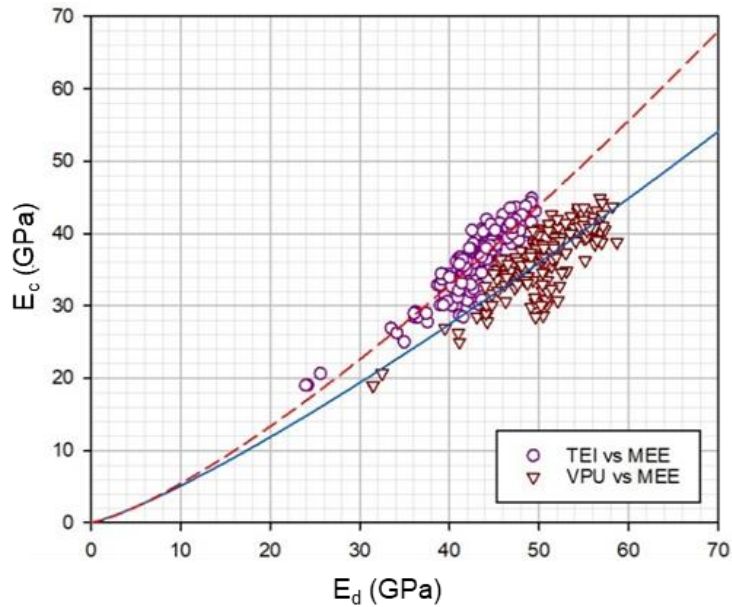
**Fonte: Autor (2020)**

Para a determinação do módulo de elasticidade de 3 corpos de prova de concreto são necessários aproximadamente 58 minutos no ensaio estático, na técnica de excitação por impulso e na velocidade de pulso ultrassônico foi demandando em torno de 6 minutos para tal.

Essa diferença de tempo está atrelada a preparação da amostra e ao modo de realização do ensaio. No ensaio estático, além da preparação da amostra, tem-se a necessidade de averiguar o carregamento no corpo de prova antes e durante o ensaio. Além disso, no ensaio estático, quanto mais resistente o concreto, maior o tempo para verificar o módulo de elasticidade, uma vez que cargas mais altas são requeridas para os limites de tensão exigidos no ensaio.

#### 4.3.3. Análise de Regressão

Como todos os agregados são considerados basálticos e a NBR 6118 (ABNT, 2014) considera para efeito de cálculo somente a classificação da rocha, foi realizado o ajuste de regressão entre os métodos citados de forma que contemplasse todos os resultados. Dessa maneira, na Figura 53, é apresentada a regressão não-linear que melhor se adequou entre os módulos dinâmico e estático para cada método de medição aplicado (TEI e VPU).



**Figura 53 - Relação entre  $E_{d,TEI}$  vs.  $E_c$  e  $E_{d,VPU}$  vs.  $E_c$**   
**Fonte: Autor (2020)**

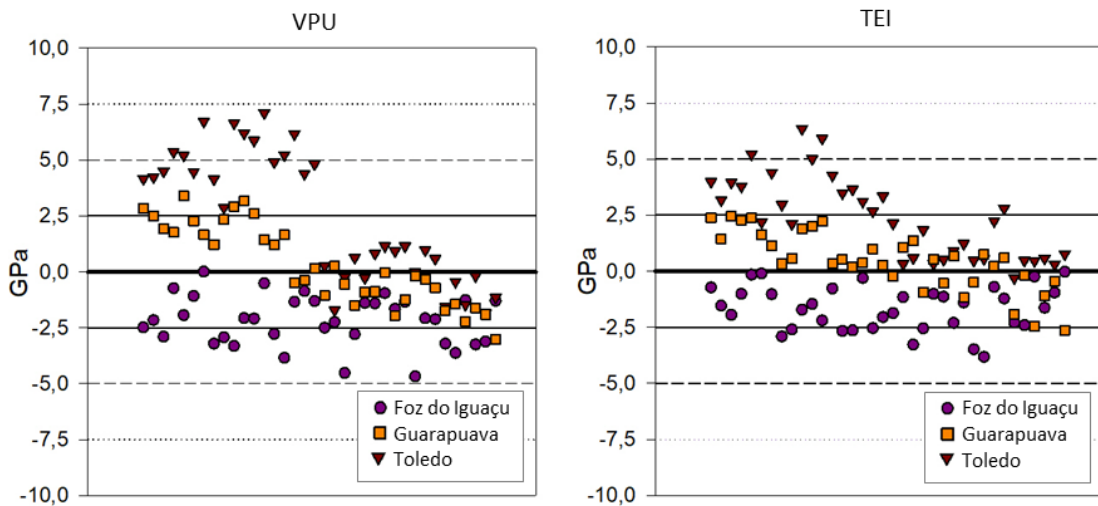
De forma geral, a relação entre o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), pelo método VPU, e o módulo estático ( $E_c$ ), com  $r^2$  de 0,6777 e erro máximo de 7,10 GPa, é expresso por meio da Equação 38:

$$E_c = 0,3128 \cdot E_{d,VPU}^{1,2128} \quad \text{Equação (38)}$$

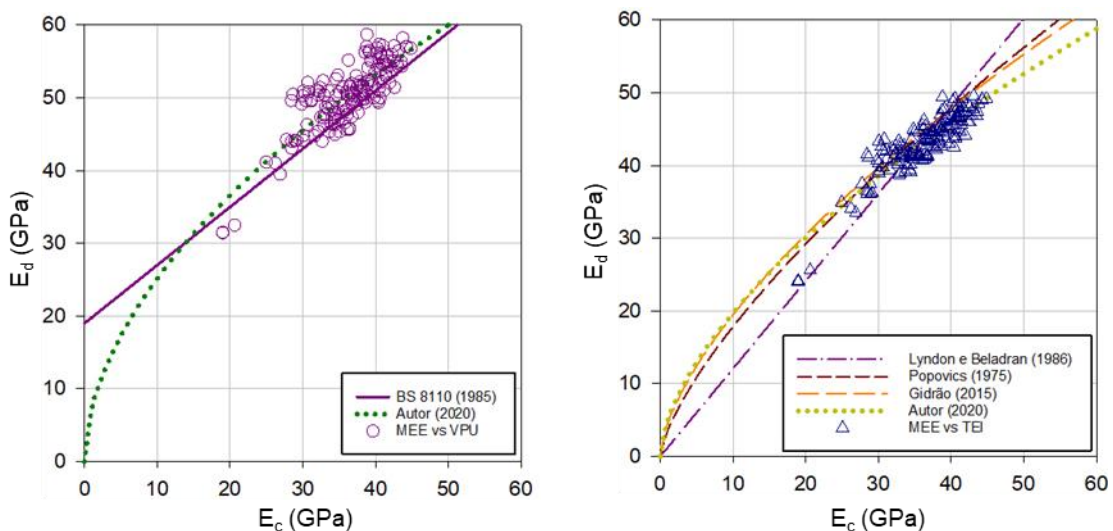
Considerando o modo longitudinal igual o modo flexional, conforme discutido no item 4.3.1, segue a equação de correlação, com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) igual a 0,7930 e erro máximo de 6,35 GPa, entre o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) pelo TEI e o módulo de elasticidade estático ( $E_c$ ):

$$E_c = 0,2705 \cdot E_{d,TEI}^{1,3007} \quad \text{Equação (39)}$$

Na Figura 54 é possível verificar o gráfico de erros referente a equação de regressão e os valores mensurados. Na Figura 55 é mostrada a relação dos resultados do presente estudo junto com as curvas de alguns modelos mencionados na revisão bibliográfica.



**Figura 54 - Gráfico de erros, em GPa, da equação de regressão não-linear**  
**Fonte: Autor (2020)**



**Figura 55 - Comparação de resultados de  $E_c$ - $E_d$  com equações proposta por norma e literatura**  
**Fonte: Autor (2020)**

Quando analisadas as expressões da literatura, é perceptível que as equações propostas são na sua maioria referente ao método vibracional. Para concretos com até 35 GPa de módulo de elasticidade estático, os modelos de Popovics (1975) e Gidrão (2015) tiveram desempenho gráfico similar a equação de regressão encontrada neste estudo. A partir deste valor, os modelos propostos pelos autores começaram a resultar valores de módulo de elasticidade maiores do que aqueles mensurados. Já para o método de Velocidade de Pulso Ultrassônico, os valores da equação da norma britânica BS 8110 (1985) foram, em sua maioria, subestimados aos resultados deste trabalho.

Afim de contribuir para uma melhoria das expressões de relação entre os módulos de elasticidade, foi realizada uma análise dos fatores que mais influenciam nos resultados e proposta uma formulação matemática (Equação 40) com atribuição de coeficientes de correção.

$$E_c = 0,7 \cdot E_d \cdot \alpha_{Ed} \cdot \beta_{ag} \cdot \gamma_{ag} \quad \text{Equação (40)}$$

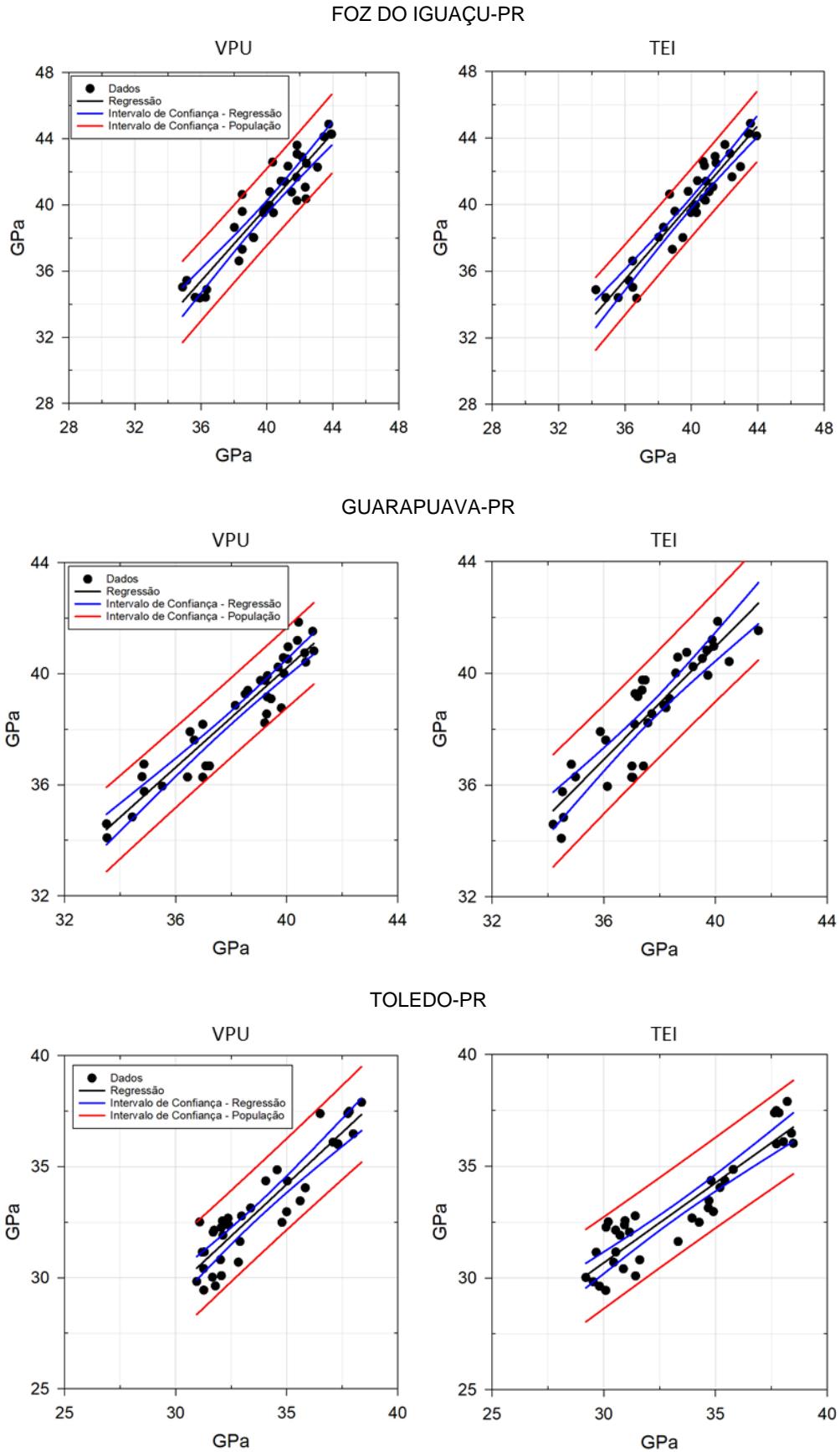
Onde  $E_c$  é o módulo de elasticidade estático, em GPa,  $E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico, em GPa,  $\alpha_{Ed}$  é o coeficiente do método de ensaio empregado,  $\beta_{ag}$  é o coeficiente referente ao teor de agregado graúdo no concreto e  $\gamma_{ag}$  é o coeficiente referente a massa específica do agregado graúdo. Os valores dos respectivos coeficientes estão listados na Figura 56 em função do agregado.

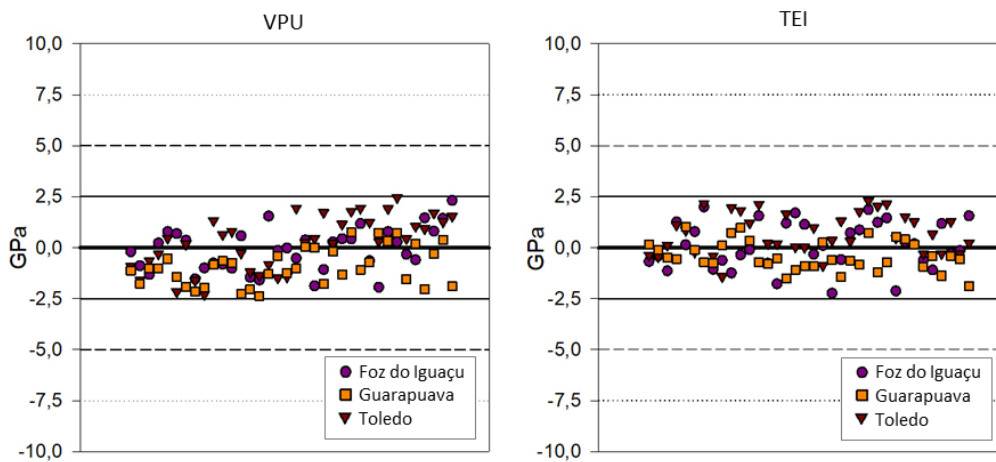
Coeficientes de Correção	
$\alpha_{Ed} \begin{cases} 1,00 \text{ para VPU} \\ 1,15 \text{ para TEI} \end{cases}$	
<i>Para massa específica do basalto <math>\leq 2,80 \text{ g/cm}^3</math></i>	
$\gamma_{ag} = 0,95$	$\beta_{ag} \begin{cases} 0,90 \text{ para teor de agregado graúdo } > 48\% \\ 1,05 \text{ para teor de agregado graúdo } \leq 48\% \end{cases}$
<i>Para massa específica do basalto <math>2,80 \text{ g/cm}^3 &lt; \rho &lt; 2,90 \text{ g/cm}^3</math></i>	
$\gamma_{ag} = 1,05$	$\beta_{ag} \begin{cases} 0,95 \text{ para teor de agregado graúdo } > 48\% \\ 1,00 \text{ para teor de agregado graúdo } \leq 48\% \end{cases}$
<i>Para massa específica do basalto <math>\geq 2,90 \text{ g/cm}^3</math></i>	
$\gamma_{ag} = 1,10$	$\beta_{ag} = 1,00$

**Figura 56 - Valores dos coeficientes de correção para a equação de relação entre o módulo de elasticidade estático e o dinâmico**

**Fonte: Autor (2020)**

A partir desta equação, coeficiente de determinação ( $r^2$ ) variou entre 0,811 e 0,901 (Figura 57) e o erro máximo encontrado foi de 2,46 GPa (Figura 58).





**Figura 58 - Gráfico de erros da equação proposta**

Fonte: Autor (2020)

Com o ajuste em função do agregado graúdo, os dados estiveram inclusos dentro do intervalo de confiança da população e bem próximos do intervalo de confiança da regressão. Em alguns casos, o erro diminuiu aproximadamente 5,72 GPa quando comparado com as equações da regressão não linear. Deste modo, a equação proposta tem potencial para prever o módulo de elasticidade estático do concreto em função do módulo de elasticidade dinâmico para as condições de contorno que orientaram seu desenvolvimento.

Caso não haja as informações para atribuição dos coeficientes de correção, ainda é possível utilizar as equações simplificadas (Equação 41 e 42), conforme formulações típicas encontrada na literatura. Contudo, seu uso está passível de maiores erros por ser tratar de uma formulação matemática generalizada.

$$E_c = 0,72 \cdot E_{d,VPU} \quad \text{Equação (41)}$$

$$E_c = 0,84 \cdot E_{d,TEI} \quad \text{Equação (42)}$$

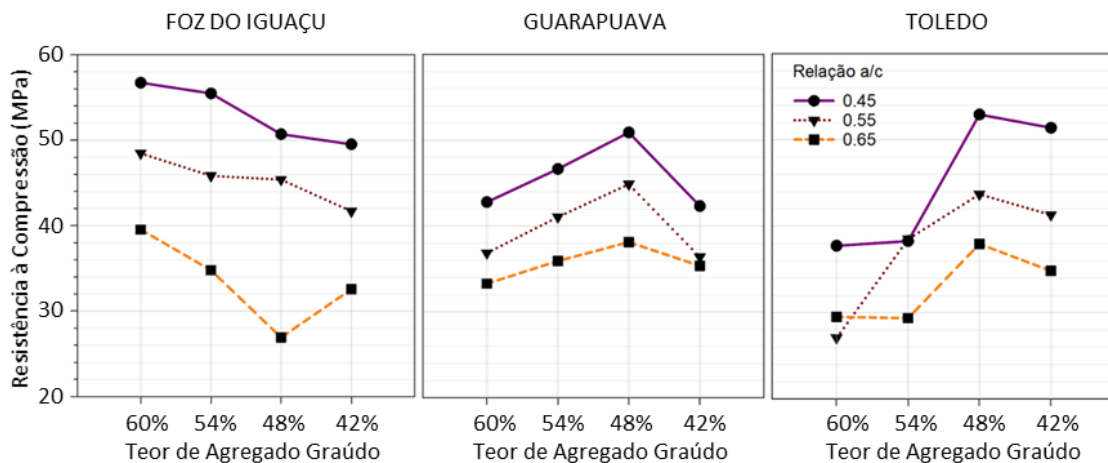
Onde  $E_c$  é o módulo de elasticidade estático, em GPa,  $E_{d,TEI}$  é o módulo de elasticidade dinâmico pelo método da técnica de excitação por impulso, em GPa e  $E_{d,VPU}$  é o módulo de elasticidade dinâmico pelo método de velocidade de pulso ultrassônico, em GPa.



#### 4.4. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO E A RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Os valores de resistência à compressão, na idade de 28 dias, variaram de 25,89 a 58,09 MPa, 24,16 a 53,09 MPa e 24,31 a 54,17 MPa para os diferentes teores de agregado graúdo, relações água/cimento em função do basalto de Foz do Iguaçu-PR, Guarapuava-PR e Toledo-PR, respectivamente. Na mesma ordem, o desvio padrão para cada tipo de agregado variou de 0,80 a 2,75 MPa, 0,21 a 5,69 MPa e 0,58 a 7,14 MPa

Na Figura 59 é apresentado o gráfico da média da resistência à compressão do concreto em função do teor de agregado graúdo e relação água/cimento.



**Figura 59 - Influência do tipo de agregado, teor de argamassa e relação água/cimento na resistência à compressão do concreto**

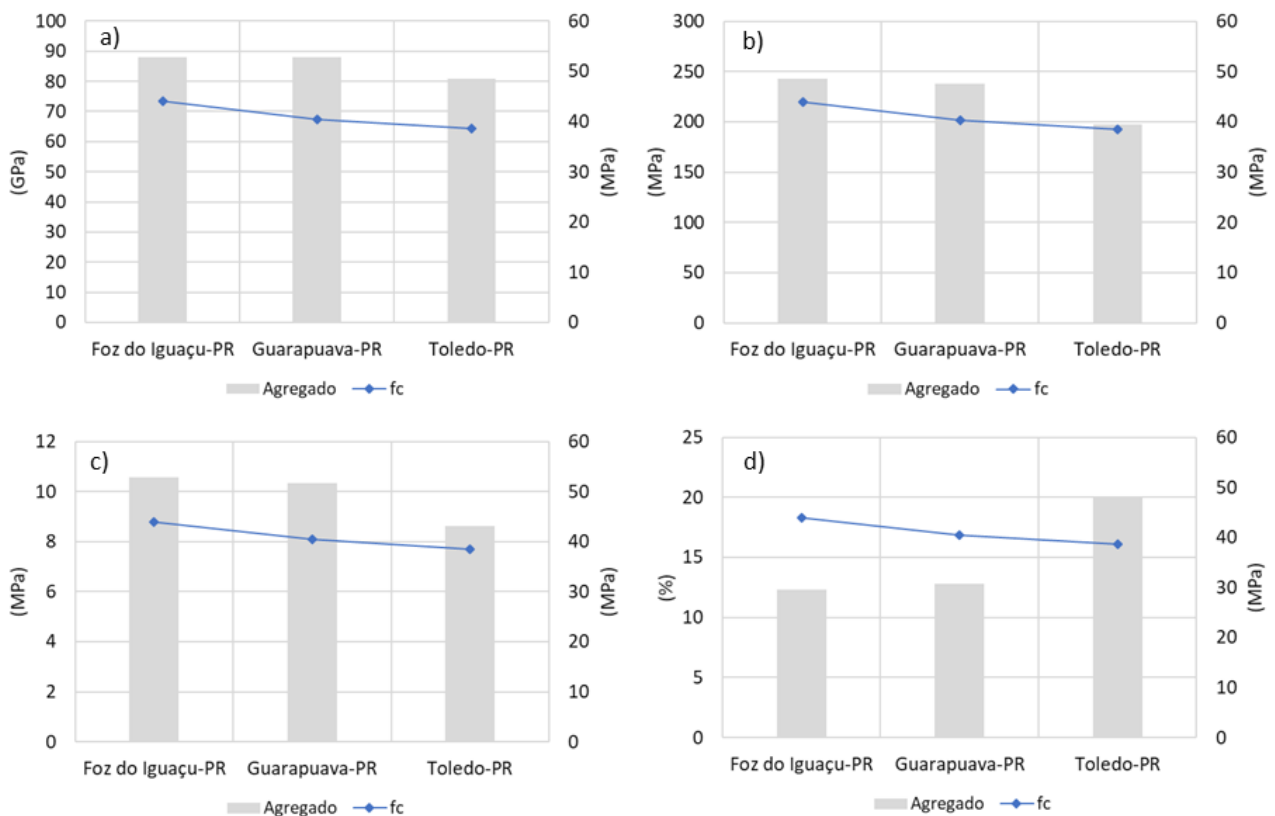
Fonte: Autor (2020)

Conforme a Lei de Abrams, o aumento da relação água/cimento nas dosagens diminuiu a resistência à compressão do concreto. Isso ocorre, segundo Mehta e Monteiro (2014), por conta do acréscimo de água que resulta no aumento da porosidade da pasta de cimento endurecida, contribuindo diretamente na diminuição da resistência.

Além da água e do cimento, o concreto é composto por areia e brita. Quando analisadas as propriedades mecânicas de cada elemento de forma individual, na maioria dos casos a resistência do agregado graúdo é superior à resistência da matriz cimentícia (BILESKY, 2016) (PIASTA, GÓRA e BUDZYSKI, 2017). Seria sempre esperado,

portanto, a tendência de aumento da resistência mecânica do concreto em função do aumento do teor de agregado graúdo.

A menor resistência para o concreto com o basalto de Toledo-PR é proveniente da porosidade da rocha. Conforme averiguado no ensaio de caracterização, o agregado tem elevado número de vazios, acarretando a diminuição da resistência mecânica da rocha. Algumas relações são apresentadas na Figura 60 para se evidenciar isto.



**Figura 60 - Relação entre a resistência e a) o módulo de elasticidade do agregado; b) a resistência à compressão uniaxial; c) o índice de carga pontual; d) a resistência ao esmagamento**

Fonte: Autor (2020)

Compreende-se que, mesmo o agregado sendo poroso, a tendência da resistência mecânica em função de seu teor não deveria ser tão diferente quanto os resultados obtidos para o concreto contendo agregados de Foz do Iguaçu-PR. Apenas os valores de resistência seriam menores, mas não a tendência em função do teor.

Acredita-se que a tendência contrária observada para a resistência mecânica dos concretos contendo agregados de Toledo-PR (talvez também Guarapuava-PR) se devam pela absorção de água destes. Conforme já mencionado, a água absorvida pelos agregados talvez pudesse até favorecer a hidratação do cimento ao

seu redor. Todavia, estima-se que seja também possível que uma concentração excessiva de umidade (ou água) pode atrapalhar na definição de uma interface resistente entre agregado e argamassa, por elevar localmente a relação água/cimento.

No caso da medida de resistência mecânica por compressão, o resultado pode ser ainda mais complexo, já que a água tende a reduzir a resistência de cerâmicas por um efeito corrosivo da ponta da trinca. De acordo com a Tabela 11, a absorção de água do agregado de Toledo pode chegar a 1,49% de sua massa seca.

Para verificar se houve variação significativa no conjunto de dados, foi realizado o teste de variância e os resultados estão expressos na Tabela 24.

**Tabela 24 - ANOVA – Resistência à compressão**

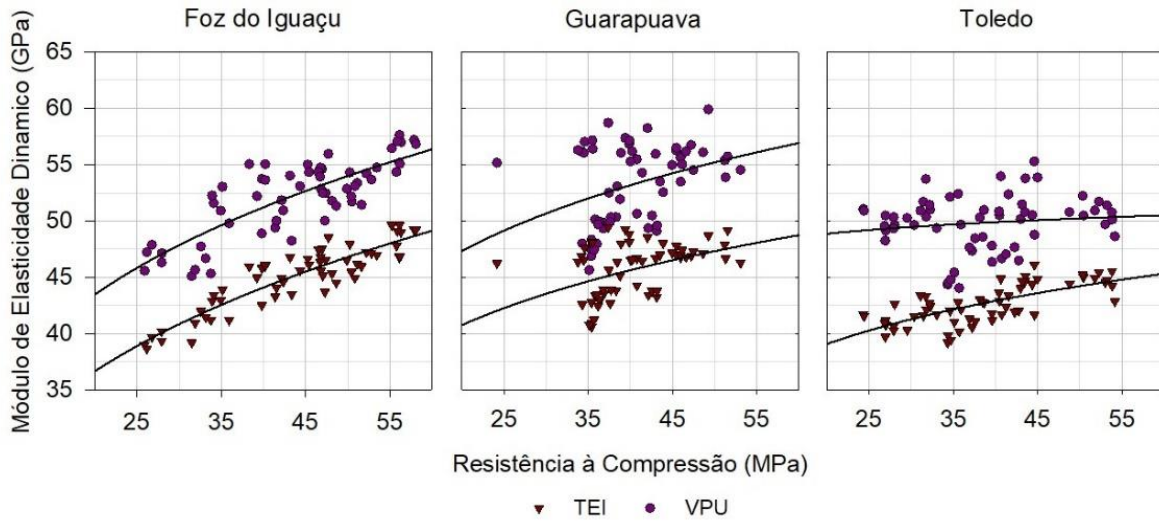
Matriz de Variação	GDL	SQ	MQ	F	p-valor	Significância
Agregado Graúdo	2	912,349	456,174	77,494	<0,001	Sim
Teor de Argamassa	3	455,595	151,865	25,799	<0,001	Sim
Relação a/c	2	5834,56	2917,28	495,582	<0,001	Sim
Agregado Graúdo x Teor de Argamassa	6	2310,766	385,128	65,425	<0,001	Sim
Agregado Graúdo x Relação a/c	4	604,632	151,158	25,678	<0,001	Sim
Teor de Argamassa x Relação a/c	6	256,979	42,83	7,276	<0,001	Sim
Agregado Graúdo x Teor de Argamassa	12	318,153	26,513	4,504	<0,001	Sim
Residual	144	847,666	5,887			
Total	179	11540,7	64,473			

GDL: Graus de liberdade; SQ: Soma dos quadrados; MQ: Média quadrática. F: MQm/MQr

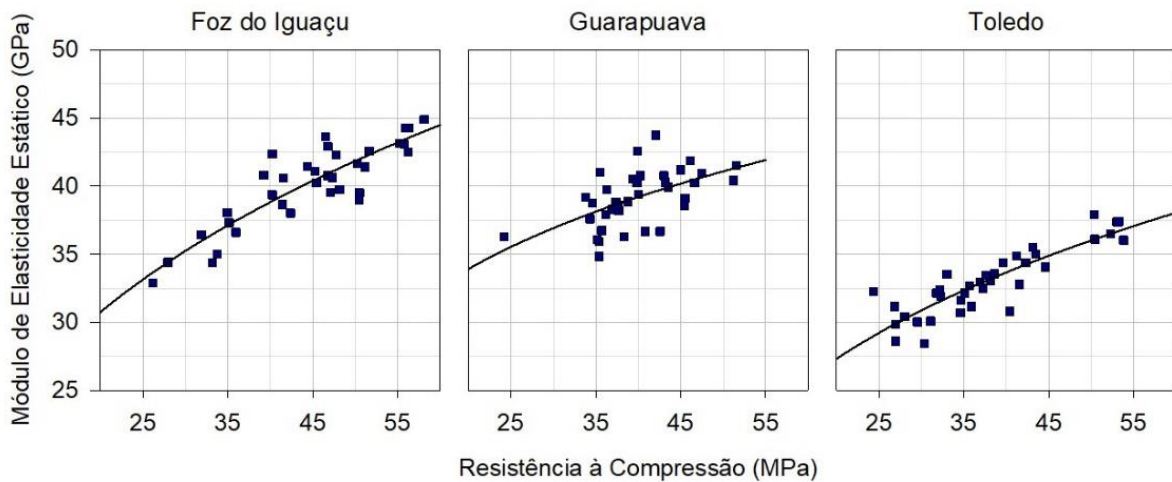
**Fonte: Autor (2020)**

Estatisticamente, o tipo de agregado, a água/cimento, os teores de argamassa e suas interações tiveram variação significativa no resultado da resistência à compressão do concreto. Quando realizada a comparação individual por meio do teste Holm-Sidak, foi possível verificar que para todos os agregados não houve variância significativa entre os teores 60% e 54%. Acima de 48% de teor de agregado graúdo, os resultados demonstraram não haver variância significativa, mostrando que os efeitos da pasta de cimento se sobrepõem aos efeitos do agregado.

Como apresentado no item 2.1.2, com a resistência à compressão do concreto é possível estimar o módulo de elasticidade. Na Figura 61 e 62 é apresentada a correlação do módulo de elasticidade dinâmico e estático com a resistência do concreto aos 28 dias para o basalto de Foz do Iguaçu-PR, Guarapuava-PR e Toledo-PR.



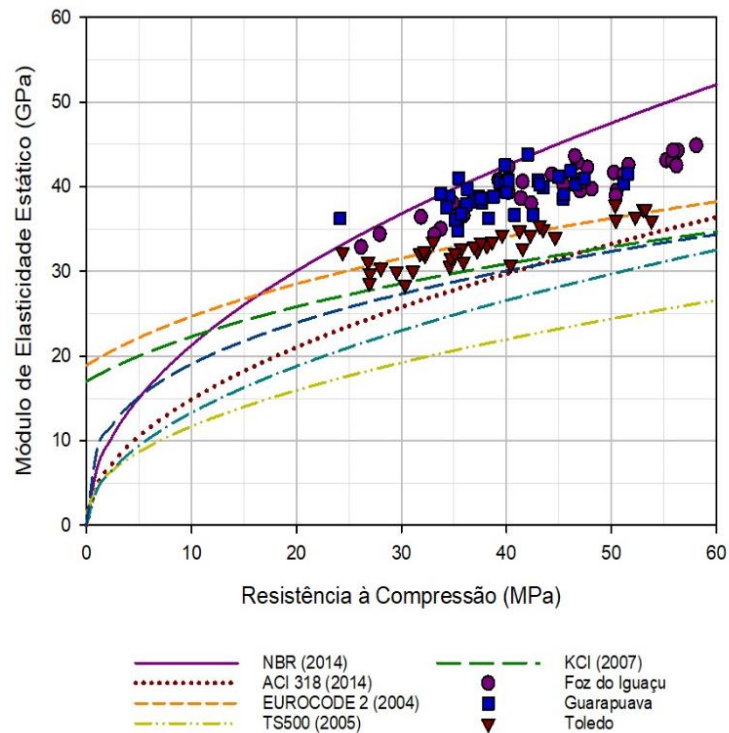
**Figura 61 - Correlação entre o módulo de elasticidade dinâmico e a resistência à compressão para concretos aos 28 dias**



**Figura 62 - Correlação entre o módulo de elasticidade estático e a resistência à compressão para concretos aos 28 dias**

Fonte: Autor (2020)

Figura 63 é mostrada a relação dos resultados do presente estudo junto com as curvas de alguns modelos mencionados no item 2.1.2.



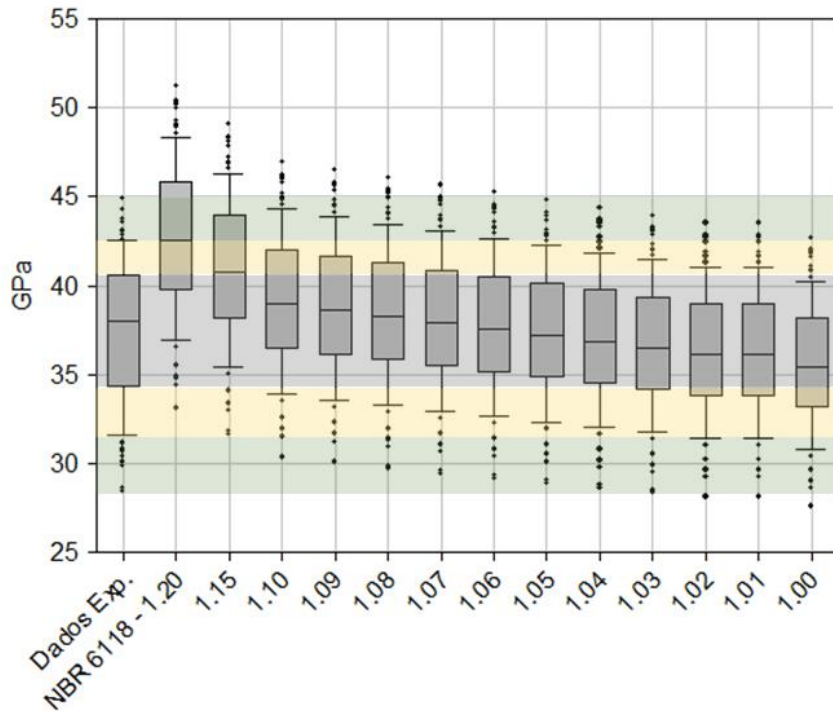
**Figura 63 - Comparação de resultados de módulo em função da resistência com equações propostas por diferentes normas e autores**

**Fonte: Autor (2020)**

Os valores obtidos experimentalmente estiveram, na sua maioria, acima dos valores pressupostos pelas expressões utilizadas como comparativo. Dentre as equações propostas, os valores experimentais estiveram mais próximos do basalto de Toledo-PR, sendo o melhor ajuste da Eurocode 2 (2004). Já o basalto de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR não tiveram nenhuma equação que satisfizessem, de forma considerável, os resultados do experimento.

A norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014) preconiza, em seu modelo, a aplicação de um coeficiente em função do tipo de agregado graúdo utilizado no concreto (Equação 9 e 10), no caso deste experimento, o valor a ser utilizado é 1,20 pelo fato dos agregados graúdos serem de origem basáltica. Contudo, os valores estimados empregando-se este coeficiente são superiores aos observados experimentalmente. É possível que essas diferenças nos resultados utilizando os coeficientes de correção seja devido a versatilidade das características das rochas. Como visto neste estudo, mesmo utilizando basalto em todas as concretagens, quando analisando a proveniência de cada rocha de forma regional, cada um gerou resultados diferentes nas amostras do experimento.

Para verificar qual seria o melhor coeficiente adequado a ser adotado pela norma para o basalto deste estudo, foi realizado uma análise utilizando o boxplot, conforme apresentado na Figura 64.

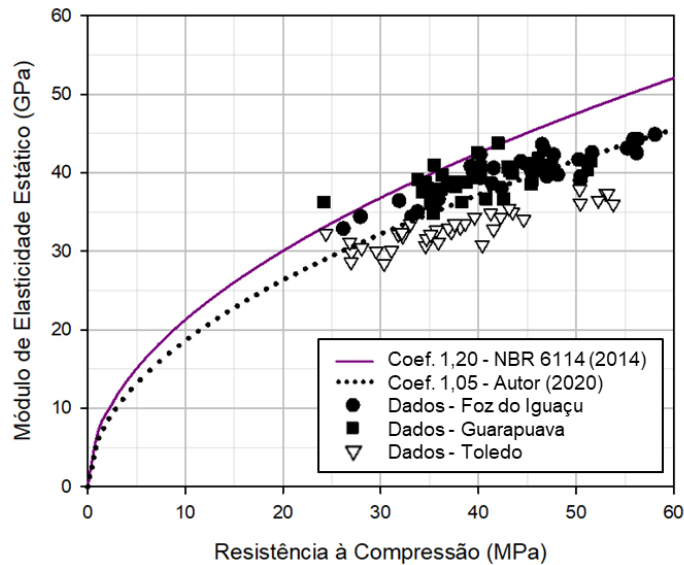


**Figura 64 - Boxplot dos resultados utilizando a equação da NBR 6118 (ABNT, 2014)**

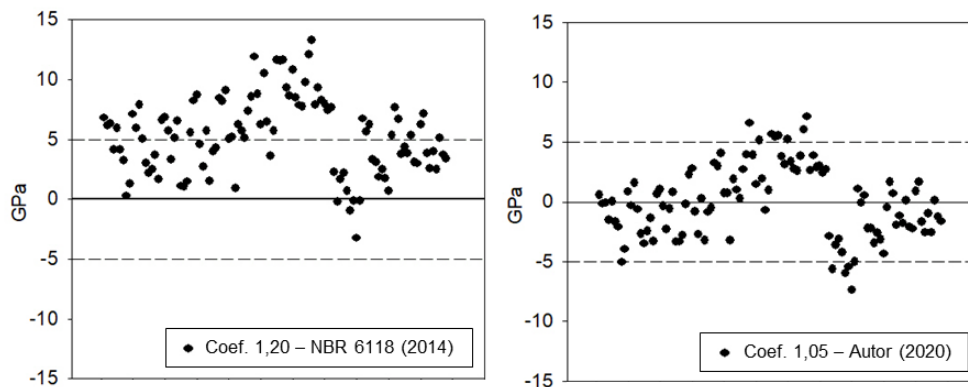
Fonte: Autor (2020)

Observa-se que o valor de 1,20 para o coeficiente do agregado basáltico, que a NBR 6118 (ABNT, 2014) solicita que seja utilizado, está acima do esperado quando comparado com os resultados experimentais. Realizando um estudo estatístico com vários coeficientes, o que melhor que se ajustou com os dados experimentais foram os coeficientes contidos entre o intervalo 1,04 e 1,06.

Ainda que os valores sejam, em alguns casos, um pouco superestimados para o basalto de Toledo-PR e subestimados para o basalto de Foz do Iguaçu-PR e Guarapuava-PR, por haver diferenças nas características das rochas, quando opta-se pela utilização do coeficiente 1,05 (Figura 65), há uma melhor adequação para os resultados do experimento, além de diminuir o erro máximo de 13,27 GPa para 7,37 GPa (Figura 66).



**Figura 65 - Adequação do coeficiente para o basalto do terceiro planalto paranaense na NBR 6118**  
**Fonte: Autor (2020)**



**Figura 66 - Gráfico de erros utilizando coeficiente 1,20 e 1,05 na equação da NBR 6118 (2014)**  
**Fonte: Autor (2020)**

Outros autores também averiguaram que há divergência em relação aos coeficientes propostos pela norma brasileira. Girardi (2018) analisou o agregado basalto, granito e diabásio e verificou que os resultados de módulo de elasticidade do concreto estimados pela norma são superiores aos valores experimentais para resistência à compressão a partir de 35 MPa. Bilesky (2016) constatou que os resultados para concretos com agregado calcário não foram inferiores aos de concreto com granito, destoando dos valores de coeficiente da norma. No estudo de Lopes *et al.* (2017), os autores concluíram que, para os concretos utilizando gnaíse, os resultados teóricos foram menores do que os do experimento, enquanto os concretos produzidos com basalto e granito obtiveram valores teóricos menores nas resistências mais baixas e maiores nas resistências mais elevadas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados do projeto experimental deste trabalho, foi possível averiguar os fatores de influência do módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto, analisar as relações entre as propriedades mecânicas do concreto e verificar os modelos empíricos proposto em normas e na literatura para a avaliação do módulo de elasticidade. Sendo assim, foi possível concluir que:

- Embora a relação água/cimento tenha ocasionado variações nos resultados do módulo de elasticidade, essa variação não foi tão expressiva, com média de aproximadamente 3,35 GPa (7,3%).
- Corpos de prova com maior volume de agregado (60%), na sua grande maioria, tiveram maiores valores de módulo de elasticidade quando comparado aos concretos com menor teor de agregado (42%). A média da variação dos resultados entre os teores de agregado citados foi de 4,38 GPa, representando uma diferença de aproximadamente 9,28%.
- A origem do agregado graúdo foi o fator que teve maiores variâncias nos resultados. Em alguns casos, concretos produzidos com o basalto da jazida de Toledo-PR apresentaram valores de módulo de elasticidade aproximadamente 30% inferiores em relação aos concretos produzidos com o basalto de Foz do Iguaçu e Guarapuava.
- O módulo de elasticidade tende a subir nas idades iniciais do concreto, devido às reações de hidratação do cimento Portland. Neste estudo, pelo fato de ser utilizado um cimento de alta resistência inicial, a maior acentuação de valores ocorreu até o sétimo dia de cura. A partir deste instante, começou o processo de estabilização, tendo menores variações até a idade de 91 dias.
- Os valores do módulo dinâmico são aproximadamente 16% e 28% superiores ao estático para os métodos da Técnica de Excitação por Impulso (TEI) e Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), respectivamente.
- Nas idades iniciais, os modos de vibração longitudinal e flexional no método TEI, verificou-se uma divergência de aproximadamente 15 GPa.



- Para a idade de 28 dias, os valores de módulo de elasticidade mensurados pelo método TEI no modo vibracional longitudinal e flexional não apresentam, com 95% de confiança, variância significativa nos resultados.
- Para o ensaio TEI, o modo de vibração longitudinal conduziu a menores valores de desvio padrão quando comparado com o modo flexional, sendo recomendada sua utilização.
- Para a determinação do módulo de elasticidade do concreto, a realização de ensaios dinâmicos é aproximadamente 10 vezes mais rápida que o ensaio estático. Considerando o tempo de preparo de amostra e execução de ensaios, são demandados para três amostra de concreto, um tempo médio de 6 minutos para o TEI e o VPU e 56 minutos para o Estático.
- As relações empíricas para aferição do módulo de elasticidade estático por meio da resistência à compressão do concreto, utilizando o basalto como agregado graúdo, obteve resultados teóricos acima dos valores experimentais quanto aplicada a norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2014). Sendo assim, com base nos resultados experimentais deste estudo, recomenda-se a utilização do coeficiente de correção em função do tipo do agregado como 1,05, e não 1,20 como sugere a norma brasileira para agregados com a classificação basalto.
- Sobre a relação entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico, embora a literatura traga boas curvas de correlação, é explorado de maneira mais acentuada somente o método de vibração para módulo de elasticidade dinâmico, deixando a desejar o método da velocidade de pulso ultrassônico.
- Com coeficiente de correlação variando entre 0,811 e 0,901 e erro máximo de 2,46 GPa, foi proposta uma equação (Equação 40) para prever o módulo de elasticidade estático do concreto ( $E_c$ ) em função do método de ensaio (TEI ou VUP) utilizado para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), da massa específica do agregado graúdo e teor de agregado graúdo no concreto.

De maneira geral, as melhores correlações entre o módulo de elasticidade estático e dinâmico são aquelas de maneira singular ao tipo de agregado graúdo, relação

água/cimento, variações de teor de argamassa, tipo de cimento, e entre outros parâmetros que afetam a microestrutura do material. Quando não há as informações citadas, ainda é possível utilizar uma equação simplificada (Equação 41 e 42), contudo com possibilidade de maior variação de erro.

Neste sentido, este trabalho contribuiu em fornecer informações relevantes a respeito do módulo de elasticidade estático e dinâmico de concretos produzidos com diferentes agregados de basalto do terceiro planalto paranaense, além de colaborar<sup>24</sup> com a criação da norma técnica brasileira para verificação do módulo de elasticidade dinâmico do concreto.

### 5.1. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com o propósito de acrescentar conhecimento a respeito do módulo de elasticidade dinâmico e estático do concreto, recomenda-se para trabalhos futuros:

- Avaliar outros tipos de agregado graúdo com o intuito de mapeá-los e caracterizá-los para a verificação quanto a sua influência no módulo de elasticidade.
- Verificar de forma mais aprofundada a variação do módulo de elasticidade nas idades iniciais do concreto, utilizando vários tipos de cimento.
- Averiguar a influência de superplastificante no módulo de elasticidade em concretos com alto teor de argamassa.
- Reavaliar o coeficiente indicado na NBR 6114 (ABNT, 2014) para agregados de origem basáltica para determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resistência à compressão.

---

<sup>24</sup> Os dados desta dissertação foram enviados ao comitê normativo da ABNT para auxiliar na elaboração da norma: Concreto endurecido – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método das frequências naturais de vibração. Projeto 018:300.002-005. ABNT/CB-018. 2019.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AHMAD, S. H.; SHAH, S. P. Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete. **PCI Journal**, v. 30, n. 6, p. 92-119, 1985.
- [2] ALENGARAM, U. J.; MAHMUD, H.; JUMAAT, M. Z. Enhancement and prediction of modulus of elasticity of palm kernel shell concrete. **Materials and Design**, v. 32, p. 2143–2148, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.035>>.
- [3] ALMEIDA, P. A. O. **Transdutores para medida de deslocamentos lineares - Nota de aula**. Escola Plitécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.
- [4] ALMEIDA, S. M. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- [5] ALMUSALLAM, A. A. et al. Effect of silica fume on the mechanical properties of low quality coarse aggregate concrete. **Cement and Concrete Composities**, v. 26, p. 891-900, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.09.003>>.
- [6] ALSALMAN, A. et al. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 918–928, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>>.
- [7] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 363R-92: State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete**. Farmington Hills. 2010.
- [8] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete**. Farmington Hills. 2014.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5731: Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications**. ASTM International. West Conshohocken. 2008.
- [10] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C469M-14: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression concrete cylinders**. ASTM International. West Conshohocken. 2014.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C469M - 14: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression**. ASTM International. West Conshohocken. 2014.

- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876-15: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. ASTM International. West Conshohocken, p. 17. 2015.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. ASTM International. West Conshohocken. 2016.
- [14] ARAÚJO, S. S.; GUIMARÃES, G. N.; GEYER, A. L. B. Influência do tipo de medição, do tipo de concreto e da dimensão do corpo de prova cilíndrico na determinação do módulo estático de elasticidade do concreto. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 15, n. 1, p. 11-23, 2015.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. ABNT. Rio de Janeiro. 1998.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. ABNT. Rio de Janeiro. 2003.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. ABNT. Rio de Janeiro. 2006.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. ABNT. Rio de Janeiro. 2008.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. ABNT. Rio de Janeiro, p. 12. 2009.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: Agregado graúdo**. ABNT. Rio de Janeiro. 2009.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7389-2: Análise petrográfica de agregado para concreto**. ABNT. Rio de Janeiro. 2009.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. ABNT. Rio de Janeiro. 2009.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. ABNT. Rio de Janeiro. 2009.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9938: Agregados - Determinação da resistência ao esmagamento de agregados graúdos - Método de ensaio**. ABNT. Rio de Janeiro. 2013.

- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. ABNT. Rio de Janeiro. 2014.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16372: Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. ABNT. Rio de Janeiro. 2015.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. ABNT. Rio de Janeiro. 2017.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. ABNT. Rio de Janeiro. 2017.
- [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão dos corpos-de-prova cilíndricos**. ABNT. Rio de Janeiro. 2018.
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. ABNT. Rio de Janeiro. 2019.
- [31] ATTIOGBE, E.; DARWIN, D. Submicrocracking in cement paste and mortar. **ACI Materials Journal**, n. 84, p. 491-500, 1987.
- [32] AWAL, A. S. M. A.; MOHAMMADHOSSEINI, H.; HOSSAIN, Z. Strength, modulus of elasticity and brittleness index of rubberized concrete. **International Journal of GEOMATE**, v. 9, n. 1, p. 1441-1446, 2015.
- [33] BAHR, O. et al. Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations. **Materials and Design**, v. 45, p. 421–429, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.070>>.
- [34] BENETTI, J. K. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. São Leopoldo: Dissertação (Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2012.
- [35] BENTUR, A. Microstructure interfacial effects and micromechanics of cementitious composites. **Advances in Cementitious Materials**, 16, 1990. 523-549.
- [36] BESHAR, 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, p. 97-103, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00097-1)>.
- [37] BEUSHAUSEN, H.; DITTMER, T. 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.055>>.

- [38] BEZERRA, A. C. D. S. **Influência das variáveis de ensaio nos resultados de resistência à compressão de concretos: Uma análise experimental e computacional**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 151. 2007.
- [39] BILESKY, P. C. **Contribuição aos estudos do módulo de elasticidade do concreto**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, p. 137. 2016.
- [40] 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, p. 850–860, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.054>>.
- [41] BOGAS, J. A.; GOMES, A. Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica—characterization and normalization. **International Journal of Civil Engineering**, p. 268-278, 2014.
- [42] BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS 8110-2: Structural use of concrete—part 2: code of practice for special circumstance**. BS. Londres. 1995.
- [43] BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS EN 12504-4 - Testing concrete. Determination of ultrasonic pulse velocity**. BS. Londres. 2004.
- [44] BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS EN 12390-13: Testing hardened concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression**. BS. Londres. 2013.
- [45] BROCH, E.; FRANKLIN, J. A. The Point-Load Strength Test. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 9, 1972. 669-697.
- [46] CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**. 7<sup>a</sup>. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2007.
- [47] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **Concrete materials and methods of concrete construction and Test methods and standard practices for concrete**. CSA. [S.I.], p. 690. 2014.
- [48] CHEN, D. et al. Advances in multi-scale simulation of hygro-thermo- mechanical deformation behavior of structural concrete. **International Journal of Civil Engineering**, 2015. 267–277.
- [49] CHEN, D. et al. Degradation of Dynamic Elastic Modulus of Concrete under Periodic Temperature-Humidity Action. **Materials**, 2020. 611. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma13030611>>.
- [50] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 90**. Lausanne, p. 460. 1993. (978-0-7277-1696-5).
- [51] CONTROLS GROUP. **Strain gauges**. [S.I.]. 2019.

- [52] COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Módulos elástico : visão geral e métodos de caracterização**. São Carlos. 2010.
- [53] CRAEYE, B. et al. Modulus of elasticity and tensile strength of self-compacting concrete: Survey of experimental data and structural design codes. **Cement & Concrete Composites**, v. 54, p. 53–61, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.011>>.
- [54] DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.
- [55] DEMARCHI, R. A. **Estudo sobre a variabilidade do módulo de deformação do concreto associada a fatores intrínsecos à produção do material**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2011.
- [56] DILEK, U.; LEMING, M. L. Elastic dynamic young's modulus and permeability of concrete in fire damaged structural members. **Journal of Materials in Civil Engineering** , v. 20, n. 2, p. 102-110 , 2008.
- [57] DOS ANJOS, A. **Planejamento de Experimentos I**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 98. 2005.
- [58] DUAN, Z. H.; KOU, S. C.; POON, C. S. Using artificial neural networks for predicting the elastic modulus of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 524–532, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.064>>.
- [59] EL-NEWIHY, A. et al. Effect of polypropylene fibers on self-healing and dynamic modulus of elasticity recovery of fiber reinforced concrete. **Fibers**, v. 6, n. 9, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/fib6010009>>.
- [60] ELSHARIEF, A.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1837-1849, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00205-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00205-9)>.
- [61] ESCADEILLAS, G.; MASO, J. C. Approach of the initial state in cement paste, mortar, and concrete. **Advances in Cementitious Materials**, v. 16, p. 169-184, 1991.
- [62] ESTOLANO, V. et al. Assessment of static and dynamic modulus of elasticity. **Matéria**, v. 23, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0310>>.
- [63] EUROPEAN STANDARD. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Brussels, p. 225. 2004.
- [64] GALO BARDES, I. et al. Estimation of the modulus of elasticity for sprayed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 48–58, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.046>>.

- [65] GAO, J. et al. Durability of concrete exposed to sulfate attack under flexural loading and drying–wetting cycles. **Construction and Building Materials**, 2013. 33-38. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.033>>.
- [66] GIRARDI, R. **Avaliação da influência de diferentes parâmetros de dosagem sobre o módulo de deformação do concreto de cimento Portland**. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018. 238 p.
- [67] GRAYBEAL, B. Compressive behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 2, p. 146-152, 2007.
- [68] GRAYBEAL, B. **Compression response of a rapid-strengthening ultra-high performance concrete formulation**. FHWA-HRT-12-064 - Federal Highway Administration. [S.l.]. 2012.
- [69] GRONDIN, F.; MATALLAH, M. How to consider the Interfacial Transition Zones in the finite element modelling of concrete? **Cement and Concrete Research**, v. 58, p. 67-75, 2014.
- [70] GUO, J. et al. Effect of dry–wet ratio on properties of concrete under sulfate attack. **Materials**, 2019. 2755. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ma12172755>>.
- [71] HASSEN, S.; COLINA, H. Effect of a heating–cooling cycle on elastic strain and Young’s modulus of high performance and ordinary concrete. **Materials and Structures**, v. 45, p. 1861–1875, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9875-5>>.
- [72] HELENE, P.; TERZIAN, P. R. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo, p. 350. 1992.
- [73] HONG, J. et al. Degradation law of mechanical properties of concrete subjected to freeze-thaw cycles. **Journal of Building and Materials**, 2012. 173–178.
- [74] HONGYU, S. et al. Electrical method to evaluate elastic modulus of early age concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 661–666, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.138>>.
- [75] HSU, T. T. C. et al. Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve. **Journal Proceedings**, v. 60, n. 2, p. 209-224, 1963.
- [76] INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ. **Mapeamento Geológico do Paraná**. ITCG. Curitiba. 2019.
- [77] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1920-10: Testing of concrete - Part 10: Determination of static modulus of elasticity in compression**. ISO. [S.l.]. 2010.
- [78] IRAVANI, S. Mechanical properties of high-performance concrete. **ACI Mater J**, p. 416-426, 1996.
- [79] JIANG, L.; NIU, D. Damage degradation law of concrete in sulfate solution and freeze-thaw environment. **Journal of Central South University**, 2016. 3208–3216.



- [80] JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. The influence of concrete composition on Young's modulus. **Procedia Engineering**, p. 584-591, 2015. Disponivel em: <doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.181 >.
- [81] JUROWSKI, K.; GRZESZCZYK, S. Influence of selected factors on the relationship between the dynamic elastic modulus and compressive strength of concrete. **Materials**, v. 11, 2018. Disponivel em: <<https://doi.org/10.3390/ma11040477>>.
- [82] KOCÁB, D. et al. Experimental analyses of the influence of concrete curing the development of its elastic modulus over time. **Materials and Technology**, v. 51, p. 657–665, 2013. Disponivel em: <<https://doi.org/10.17222/mit.2016.248>>.
- [83] KOKSAL, F. et al. Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1874-1880, 2008. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.04.017>>.
- [84] KOREA CONCRETE INSTITUTE. **Concrete Design Code and Commentary**. KCI. Seoul, p. 327. 2007.
- [85] LE BAS, M. J. et al. A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali-silica diagram. **Journal of Petrology**, 27, 1986. 745-750.
- [86] LEE, B. J. et al. 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**, v. 2015, 2015. Disponivel em: <<https://dx.doi.org/10.1155/2015/580638>>.
- [87] LEE, B. J. et al. Evaluating the dynamic elastic modulus of concrete using. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1155/2017/1651753>>.
- [88] LIU, B. D. et al. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 33–142, 2014. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.094>>.
- [89] LIZARAZO-MARRIAGA, J.; YÉPEZ, L. G. L. Effect of sedimentary and metamorphic aggregate on static modulus of elasticity of high-strength concrete. **Dyna**, n. 170, p. 235-242, 2011.
- [90] LOPES, J. B. E. A. **Estudo do módulo de elasticidade em concretos produzidos com agregados graúdos proveniente de diferentes rochas: comparação com o cálculo teórico da NBR 611:2014**. 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves: [s.n.]. 2017.
- [91] LU, C.-F.; YUAN, Y.-S. Micro-environment temperature response prediction for fly ash concrete in artificial climate environment. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2012. 571-577.
- [92] LU, X. et al. Evaluation of dynamic modulus of elasticity of concrete using impact-echo method. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 231–239, 2013. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.043>>.

- [93] LUI, B. D. et al. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 133-142, 2014. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.094>>.
- [94] LYDON, F. D.; BALENDRAN, R. V. Some observations on elastic properties of plain concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 16, n. 3, p. 314–324, 1986.
- [95] LYE, C.-Q.; DHIR, R. K.; GHATAORA, G. S. Elastic modulus of concrete made with recycled aggregates. **Structures and Buildings**, v. 169, p. 314–339, 2016. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1680/jstbu.15.00077>>.
- [96] MA, J.; SCHNEIDER, H. Properties of ultra-high-performance concrete. **LACER 7**, p. 25-32, 2002.
- [97] MALEŠEV, M. et al. The effect of aggregate, type and quantity of cement on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, p. 705–711, 2014. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1007/s13369-013-0702-2>>.
- [98] MARUYAMA, I. et al. Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90 °C. **Cement and Concrete Research**, v. 66, p. 48–63, 2014. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.016>>.
- [99] MAZLOOM, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, p. 347-357, 2004. Disponivel em: <[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00017-9)>.
- [100] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 4<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional Publishing, 2013. 674 p.
- [101] MENSUR, M. A.; WEE, T. H.; CHERAN, L. S. Crushed bricks as coarse aggregate for concrete. **ACI Mater J**, v. 96, n. 4, p. 478-484, 1999.
- [102] MIDDLEMOST, E. A. K. The basalt clan. **Earth Science Reviews**, 11, 1975. 337-364.
- [103] MILICEVIĆ, I.; ŠTIRMER, N.; BJEGOVIĆ, D. Relation between the compressive strength and modulus of elasticity of concrete with crushed brick and roof tile aggregates. **Structural Concrete**, v. 18, p. 366–375, 2016. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1002/suco.201500207>>.
- [104] MIYASHIRO, A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. **American Journal of Science**, 274, 1974. 321-355.
- [105] MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2007.

- [106] MUSIAŁ, M.; GROSEL, J. Determining the Young's modulus of concrete by measuring the eigenfrequencies of concrete and reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 44–52, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.150>>.
- [107] MYDIN, M. A. O.; ZAMZANI, N. M. Coconut fiber strengthen high performance concrete: Young's modulus, ultrasonic pulse velocity and ductility properties. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, 284-287 2018.
- [108] NATH, P.; SARKER, P. K. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 22–31, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034>>.
- [109] NEMATZADEH, M. et al. Experimental study on modulus of elasticity of steel tube-confined concrete stub columns with active and passive confinement. **Engineering Structures**, v. 130, p. 142–153, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.10.008>>.
- [110] NEMATZADEH, M.; NAGHIPOUR, M. Compressive strength and modulus of elasticity of freshly compressed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 476–485, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.055>>.
- [111] NEVILLE, A. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. [S.l.]: Bookman, 2016.
- [112] NIKBIN, I. M. et al. A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. **Materials and Design**, 59, 2014. 199-210. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.054>>.
- [113] NOGUCHI, T. et al. A practical equation for elastic modulus of concrete. **ACI Structural Journal**, p. 690-696, 2009.
- [114] NORWEGIAN STANDARD. **NS 3473: Design of Concrete Structures**. Norwegian Council for Building Standardization. Oslo, p. 103. 1992.
- [115] OLLIVIER, J. P.; MASO, J. C.; BOURDETTE, B. Interfacial transition zone in concrete. **Advanced Cement Based Materials**, v. 2, p. 30-38, 1995.
- [116] OTANI, L. B.; PEREIRA, A. H. A. **Estimativa do módulo de elasticidade de concretos utilizando a Técnica de Excitação por Impulso**. Informativo Técnico-Científico ATCP-ITC-07. [S.l.]. 2015.
- [117] PACHECO, R. F. R. **Análise do módulo de elasticidade de concretos usados no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [118] PARRA, C.; VALCUENDE, M.; GÓMEZ, F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 201–207, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.037>>.

- [119] PEREIRA, A. H. A.; OTANI, L. B. **Determinação do módulo de elasticidade do concreto empregando a Técnica de Excitação por Impulso**. ATCP Engenharia Física. [S.l.], p. 38. 2017.
- [120] PERLIN, L. P.; PINTO, R. C. A. Tomografia ultrassônica em concreto, Santa Catarina, 6, 2013. 246-269.
- [121] PIASTA, W.; GÓRA, J.; BUDZYNSKI,. 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.167>>.
- [122] POKORNY, M.; JENDZELOVSKY, N.; KONECNA, L. Determination of the dynamic modulus of elasticity and the thickness. **Key Engineering Materials**, v. 691, p. 344-355, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.691.344>>.
- [123] POPOVICS, J. S. Verification of relationships between mechanical properties of concrete-like materials. **Materials and Structures**, v. 8, n. 3, p. 183–191, 1975.
- [124] POPOVICS, J. S. **A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete**. University of Illinois - ACI-CRC Final Report. [S.l.]. 2008.
- [125] RAMÍREZ, F. C. **Detecção de danos em estruturas de concreto por meio de tomografia ultrassônica**. São Leopoldo: Dissertação (Mestrado) - Universidade Do Vale Do Rio Dos Sinos, 2015. 83 p.
- [126] RASHID, M. A.; HOSSAIN, T.; ISLAM, M. A. Higher strength concrete using crushed brick as coarse aggregate. **Indian Concrete Journal**, v. 82, n. 10, p. 18-23, 2008.
- [127] RASHID, M. A.; MANSUR, M. A.; PARAMASIVAM, P. Correlations between mechanical properties of high-strength concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 3, 2002.
- [128] SANTOS, A. C. et al. Influence of coarse aggregate on concrete's elasticity modulus. **Acta Scientiarum**, v. 39, n. 1, p. 17-25, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v39i1.29873>>.
- [129] SANTOS, A. M. et al. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico**. Congresso Brasileiro do Concreto. [S.l.]: IBRACON. 2013.
- [130] SARIDEMIR, M. Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 484–489, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.091>>.
- [131] SHAH, S. P.; AHMAD, S. H. **High Performance Concrete and Applications**. Londres: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [132] SHANNAG, M. J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 399-406, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00037-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00037-8)>.

- [133] SHARIQ, M.; PRASAD, J.; ABBAS, H. Effect of GGBFS on age dependent static modulus of elasticity of concrete. **Construction and Building Materials**, n. 41, p. 411-418, 2013. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.035>>.
- [134] SHEN, D. et al. Relationship between tensile Young's modulus and strength of fly ash high strength concrete at early age. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 317-326, 2016. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.145>>.
- [135] SHKOLNIK, I. E. Influence of high strain rates on stress-strain relationship, strength and elastic modulus of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, p. 1000-1012, 2008. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.10.001>>.
- [136] SHOUKRY, S. N. et al. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 688-696, 2011. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.020>>.
- [137] SIMEONOV, P.; AHMAD, S. Effect of transition zone on the elastic behavior of cement-based composites. **Cement and Concrete Research**, 25, 1995. 165-176.
- [138] SOUTH AFRICAN NATIONAL STANDARD. **SANS 1083: Aggregates from natural sources — Aggregates for concrete**. SANS. [S.I.]. 2014.
- [139] SRITHARAN, S.; BRISTOW, B. J.; PERRY, V. H. **Characterizing an ultra high performance material for bridge applications under extreme loads**. Orlando: [s.n.]. 2003. p. 3rd International Symposium on High Performance Concrete, PCI, Orlando, Florida, 2003.
- [140] SUKSAWANG, N.; WTAIFE, S.; ALSABBAGH, A. Evaluation of elastic modulus of fiber-reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, p. 239-249, 2018.
- [141] TASONG, W. A.; LYNSDALE, C. J.; CRIPPS, J. C. Aggregate-cement paste interface: Part I. Influence of aggregate geochemistry. **Cement and Concrete Research**, v. 29, p. 1019-1025, 1999. Disponivel em: <[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00086-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00086-1)>.
- [142] THOMAS, J.; RAMASWAMY, A. Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 19, n. 5, 2007.
- [143] TURATSINZE, A.; GARROS, M. On the modulus of elasticity and strain capacity of Self-Compacting Concrete incorporating rubber aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, p. 1209-1215, 2008. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.012>>.
- [144] TURKISH STANDARDS (TS). **TS500: Requirements for design and construction of reinforced concrete structures**. Turkish Standardization Institute. Ankara. 2005.

- [145] UYSAL, M. The influence of coarse aggregate type on mechanical properties of fly ash additive self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 533-540, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.085>>.
- [146] WANG, et al. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and Poisson's. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 129–135, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.060>>.
- [147] WANG, et al. A new dynamic testing method for elastic, shear modulus and Poisson's. **Construction and Building Materials**, v. 100, p. 129–135, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.060>>.
- [148] WEN, Z. et al. Design and preparation of high elastic modulus self-compacting concrete for pre-stressed mass concrete structures. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed**, v. 31, n. 3, p. 563-573, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11595-016-1411-y>>.
- [149] WIKIPÉDIA. Mapa do Paraná, 2020. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Paran%C3%A1>>. Acesso em: 02 Fevereiro 2020.
- [150] WU, K.-R. et al. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 1421-1425, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00588-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00588-9)>.
- [151] XIAO, Q.; NIU, D. Damage model for concrete subjected to freeze-thaw cycles and carbonation. **Journal of Building and Materials**, 2015. 763–766.
- [152] YILDIRIM, H.; SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1645–1652, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009>>.
- [153] ZANETTIN, B. Proposed new chemical classification of volcanic rocks. **Episodes**, 7, 1984. 19-20.
- [154] ZHOU, C. et al. Deterioration of concrete fracture toughness and elastic modulus under simulated acid-sulfate environment. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 490–499, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.049>>.
- [155] ZHOU, Y. et al. A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 137-145, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.110>>.
- [156] ZHU, X. et al. Effect of interfacial transition zone on the Young's modulus of carbon nanofiber reinforced cement concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 49–63, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.014>>.

# APÊNDICE A

Resultados da Caracterização do Agregado Graúdo

**ENSAIO DE ÍNDICE DE CARGA PONTUAL E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL**

**Toledo-PR**

Amostra	W (mm)	D (mm)	P (Kgf)	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	De <sup>2</sup>	I (MPa)	De	F	Is50 (MPa)	Média	RCU (MPa)
1	41,58	31,2	1608	15769,09	1297,30	1651,77	9,55	40,64	0,91	8,70		
2	40	32,07	1608	15769,09	1282,80	1633,31	9,65	40,41	0,91	8,77		
3	36,48	20,64	1088	10669,64	752,95	958,68	11,13	30,96	0,81	8,97		
4	35,47	32,98	1524	14945,33	1169,80	1489,44	10,03	38,59	0,89	8,93		
5	41,9	31,33	1558	15278,76	1312,73	1671,42	9,14	40,88	0,91	8,35		
6	43,04	32,45	1596	15651,41	1396,65	1778,27	8,80	42,17	0,93	8,15	8,61	197,95
7	42,81	30,37	1668	16357,49	1300,14	1655,39	9,88	40,69	0,91	9,01		
8	40,82	19,5	1120	10983,45	795,99	1013,49	10,84	31,84	0,82	8,84		
9	36,69	26,89	1202	11787,59	986,59	1256,17	9,38	35,44	0,86	8,04		
10	42,06	31,22	1586	15553,35	1313,11	1671,91	9,30	40,89	0,91	8,50		
11	36,06	33,33	1394	13670,47	1201,88	1530,28	8,93	39,12	0,90	8,00		

XX,XX : Valores descartados

**Guarapuava-PR**

Amostra	W (mm)	D (mm)	P (Kgf)	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	De <sup>2</sup>	I (MPa)	De	F	Is50 (MPa)	Média	RCU (MPa)
1	33,71	28,16	1728	16945,89	949,27	1208,65	14,02	34,77	0,85	11,91		
2	33,31	30,55	1960	19221,03	1017,62	1295,67	14,83	36,00	0,86	12,80		
3	28,49	23,34	1202	11787,59	664,96	846,65	13,92	29,10	0,78	10,91		
4	30,5	22,11	1042	10218,53	674,36	858,62	11,90	29,30	0,79	9,36		
5	25,97	25,91	1276	12513,29	672,88	856,74	14,61	29,27	0,79	11,48		
6	27,55	25,51	1214	11905,27	702,80	894,83	13,30	29,91	0,79	10,56	10,34	237,77
7	33,06	19,37	848	8316,04	640,37	815,35	10,20	28,55	0,78	7,93		
8	30,88	18,73	810	7943,39	578,38	736,42	10,79	27,14	0,76	8,19		
9	31,55	29,08	1410	13827,38	917,47	1168,16	11,84	34,18	0,84	9,97		
10	26,72	24,85	1254	12297,54	663,99	845,42	14,55	29,08	0,78	11,40		
11	38,32	32,6	1560	15298,37	1249,23	1590,57	9,62	39,88	0,90	8,69		

XX,XX : Valores descartados

**Foz do Iguaçu-PR**

Amostra	W (mm)	D (mm)	P (Kgf)	P (N)	A (mm <sup>2</sup> )	De <sup>2</sup>	I (MPa)	De	F	Is50 (MPa)	Média	RCU (MPa)
1	33,16	26,17	1178	11552,23	867,80	1104,91	10,46	33,24	0,83	8,70		
2	31,03	29,61	1378	13513,56	918,80	1169,85	11,55	34,20	0,84	9,74		
3	34,83	25,73	1682	16494,79	896,18	1141,05	14,46	33,78	0,84	12,12		
4	29,11	26,24	1288	12630,97	763,85	972,56	12,99	31,19	0,81	10,50		
5	30,91	29,31	1414	13866,60	905,97	1153,52	12,02	33,96	0,84	10,10		
6	34,87	24,77	1584	15533,73	863,73	1099,74	14,12	33,16	0,83	11,74	10,56	243,00
7	36,48	27,39	1448	14200,03	999,19	1272,20	11,16	35,67	0,86	9,59		
8	36,29	24,45	1564	15337,60	887,29	1129,73	13,58	33,61	0,84	11,35		
9	31,57	27,63	1486	14572,68	872,28	1110,62	13,12	33,33	0,83	10,93		
10	34,09	25,78	1754	17200,86	878,84	1118,97	15,37	33,45	0,83	12,83		
11	36,02	32,73	916	8982,89	1178,93	1501,07	5,98	38,74	0,89	5,34		

XX,XX : Valores descartados



**ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO ESMAGAMENTO**

<b>Origem Mineralógica</b>	$M_i$ (g)	$M_f$ * (g)	%	$M_i$ (g)	$M_f$ (g)	%	<b>Média</b>
Foz do Iguaçu-PR	2994,8	2670,7	12,14	2923,5	2599,6	12,46	12,30
Guarapuava-PR	3154,4	2778,5	13,53	3015,8	2689,5	12,13	12,83
Toledo-PR	2784,1	2302,8	20,90	2779,8	2335,2	19,04	19,97

\* Retido na peneira 2,4 mm

**MÓDULO DE ELASTICIDADE**

**Foz do Iguaçu-PR**

Amostra	Massa (g)	Dimensões (cm)			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	$E_d$ (GPa)	Média $E_d$ (GPa)
1	5,22	40,41	10,56	4,22	2,90	88,05	88,06
2	5,62	40,61	10,88	4,42	2,88	87,29	
3	5,33	40,69	10,46	4,40	2,84	88,35	
4	5,09	40,29	10,78	4,01	2,92	87,64	
5	5,04	40,84	10,61	4,09	2,84	88,03	
1p	5,57	41,09	10,57	4,39	2,92	87,75	
2p	5,23	41,33	10,59	4,06	2,95	87,71	
1g	71,76	101,00	15,66	15,44	2,94	87,80	
2g	69,24	100,81	15,76	14,96	2,91	89,91	

**Guarapuava-PR**

Amostra	Massa (g)	Dimensões (cm)			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	$E_d$ (GPa)	Média $E_d$ (GPa)
1	5,06	40,80	10,79	3,88	2,96	87,71	88,01
2	5,63	40,80	10,76	4,37	2,93	86,82	
3	5,86	40,74	10,73	4,55	2,94	88,39	
4	5,3	40,78	10,74	4,09	2,96	89,61	
5	5,56	40,81	10,91	4,31	2,90	85,28	
1g	73,19	100,40	15,67	15,59	2,98	89,13	
2g	68,98	100,96	14,73	15,85	2,93	89,15	

**Toledo-PR**

Amostra	Massa (g)	Dimensões (cm)			Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	$E_d$ (GPa)	Média $E_d$ (GPa)
1	6,3	40,70	11,16	4,65	2,98	84,22	81,38
2	5,84	40,45	10,84	4,32	3,08	87,69	
3	6,16	40,81	10,73	4,75	2,96	82,59	
4	5,89	40,70	10,97	4,46	2,96	84,78	
5	5,97	40,16	10,68	4,70	2,96	84,23	
1p	6,16	40,60	10,96	4,88	2,84	70,53	
2p	5,56	40,46	10,88	4,36	2,90	82,20	
1g	72,44	101,01	16,05	15,50	2,88	78,04	
2g	72,16	100,93	15,51	15,62	2,95	78,15	

## **APÊNDICE B**

Dimensões e Massa das Amostras de Concreto, Tempo e Velocidade de Propagação de Onda, Deslocamento e Deformação Específica

FOZ DO IGUAÇU   7 DIAS										
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$
60%	0,45	99,79	194,97	3927,4	39,90	4887				
		100,54	198,79	4007,7	41,20	4830				
		100,16	199,14	4001,7	40,40	4925	0,0015	0,0330	0,000015	0,000330
		99,02	200,50	4045,2	41,40	4830	0,0015	0,0310	0,000015	0,000310
		99,98	198,50	4011,7	41,40	4782	0,0010	0,0320	0,000010	0,000320
		100,39	195,49	3943,6	40,40	4900				
	0,55	100,69	195,00	3882,9	41,90	4653				
		100,15	198,08	3943,4	41,20	4805				
		100,13	196,68	3955,9	40,60	4852	0,0015	0,0295	0,000015	0,000295
		100,12	199,63	4014,0	41,90	4773	0,0020	0,0300	0,000020	0,000300
		100,52	198,37	3999,9	41,50	4771	0,0015	0,0275	0,000015	0,000275
		100,16	194,95	3925,4	40,10	4862				
0,65	100,55	198,22	3941,1	42,70	4637					
	100,27	195,82	3918,7	40,90	4792					
	100,54	198,41	3977,5	42,10	4703	0,0020	0,0270	0,000020	0,000270	
	100,36	192,64	3851,1	41,00	4707	0,0010	0,0290	0,000010	0,000290	
	99,69	197,39	3939,5	41,00	4804	0,0020	0,0285	0,000020	0,000285	
	99,94	197,48	3953,2	41,40	4758					
54%	0,45	100,13	196,02	3900,3	41,00	4780				
		99,88	197,39	3909,7	41,60	4735				
		99,98	194,41	3847,0	40,40	4813	0,0020	0,0390	0,000020	0,000390
		100,49	197,36	3920,2	41,10	4793	0,0020	0,0360	0,000020	0,000360
		100,20	197,89	3914,6	41,40	4758	0,0015	0,0325	0,000015	0,000325
		100,37	194,85	3852,3	40,40	4826				
	0,55	100,25	198,45	3937,2	41,40	4782				
		99,41	197,07	3899,8	41,50	4746				
		100,15	197,31	3909,1	41,30	4769	0,0020	0,0320	0,000020	0,000320
		100,19	192,52	3831,8	40,40	4764	0,0015	0,0300	0,000015	0,000300
		99,93	197,27	3902,9	41,80	4712	0,0015	0,0300	0,000015	0,000300
		99,46	196,59	3896,2	40,90	4792				
0,65	100,58	196,57	3894,1	42,40	4622					
	100,63	196,99	3907,2	42,40	4646					
	99,87	194,30	3844,1	41,90	4630	0,0015	0,0245	0,000015	0,000245	
	100,11	195,42	3864,0	41,20	4721	0,0010	0,0230	0,000010	0,000230	
	100,03	196,43	3884,0	42,60	4600	0,0010	0,0230	0,000010	0,000230	
	100,38	198,06	3909,3	42,70	4637					

FOZ DO IGUAÇU   7 DIAS										
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$
48%	0,45	100,56	196,88	3793,8	40,50	4864				
		99,81	196,66	3759,5	40,50	4864				
		100,34	198,54	3820,9	41,00	4829	0,0015	0,0325	0,000015	0,000325
		99,83	195,26	3776,9	41,40	4710	0,0015	0,0325	0,000015	0,000325
		100,27	197,73	3817,0	41,70	4724	0,002	0,0355	0,00002	0,000355
	99,45	196,33	3823,8	40,40	4839					
	100,06	196,22	3846,8	41,50	4722					
	100,57	196,08	3846,1	42,40	4622					
	99,51	194,93	3798,1	42,40	4599	0,003	0,0335	0,00003	0,000335	
	100,25	197,81	3861,9	41,50	4771	0,0025	0,0325	0,000025	0,000325	
42%	0,55	99,97	198,88	3881,1	41,30	4818	0,0025	0,0325	0,000025	0,000325
		99,94	198,26	3882,1	42,20	4644				
		100,31	196,85	3792,4	44,20	4457				
		99,22	196,45	3758,4	44,00	4454				
		100,20	198,32	3819,7	44,20	4479	0,002	0,022	0,00002	0,00022
	99,84	195,10	3775,5	44,30	4401	0,0025	0,023	0,000025	0,00023	
	100,58	197,74	3815,7	44,10	4489	0,002	0,0225	0,00002	0,000225	
	99,73	196,40	3822,3	43,60	4495					
	99,57	195,55	3764,2	40,90	4767					
	100,18	197,72	3818,7	40,90	4816					
0,45	99,42	197,93	3836,4	41,30	4794	0,002	0,033	0,00002	0,00033	
	100,64	193,34	3715,5	40,60	4753	0,0015	0,0335	0,000015	0,000335	
	100,51	195,04	3768,4	40,60	4802	0,002	0,033	0,00002	0,00033	
	100,35	196,12	3771,5	41,30	4745					
	99,64	196,69	3809,6	41,80	4712					
0,55	102,21	196,19	3806,7	41,60	4711					
	99,61	197,40	3814,5	42,40	4646	0,0015	0,029	0,000015	0,00029	
	100,44	197,52	3821,6	42,10	4679	0,0025	0,0295	0,000025	0,000295	
	100,10	194,15	3747,8	41,20	4708	0,002	0,029	0,00002	0,00029	
	99,96	198,39	3811,2	41,90	4725					
	100,20	198,54	3771,2	43,00	4604					
	100,60	196,06	3752,2	43,30	4568					
	100,11	201,20	3823,5	43,60	4610	0,002	0,0245	0,00002	0,000245	
	99,84	198,68	3794,1	43,80	4543	0,0025	0,0245	0,000025	0,000245	
	100,48	198,94	3782,2	43,60	4564	0,001	0,0225	0,00001	0,000225	
99,82	197,82	3731,9	43,80	4520						

FOZ DO IGUAÇU-PR   28 DIAS											
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$	
	0,45	99,07	198,50	3979,0	39,90	4962					
		100,25	199,18	4017,0	39,90	4987					
		99,70	197,13	3959,0	39,90	4937	0,0020	0,0405	0,000020	0,000405	
		100,17	197,90	3990,9	39,80	4974	0,0020	0,0395	0,000020	0,000395	
		100,24	196,73	3961,0	39,60	4974	0,0015	0,0385	0,000015	0,000385	
	99,91	201,01	4036,7	40,50	4962						
	60%	0,55	99,74	198,04	3939,8	40,70	4864				
			99,83	198,74	3969,0	40,80	4877				
			100,59	194,43	3892,7	39,60	4924	0,0020	0,0370	0,000020	0,000370
			99,56	199,18	3951,8	40,90	4865	0,0015	0,0360	0,000015	0,000360
99,31			196,48	3961,0	40,10	4887	0,0020	0,0360	0,000020	0,000360	
100,86		198,10	3994,0	40,50	4888						
0,65		100,18	193,54	3872,0	39,80	4849					
		99,84	199,61	3998,4	40,90	4889					
		100,05	194,71	3899,4	39,80	4899	0,0020	0,0305	0,000020	0,000305	
		99,94	197,85	3945,0	40,90	4841	0,0010	0,0275	0,000010	0,000275	
	100,26	200,28	4005,1	41,80	4784	0,0020	0,0295	0,000020	0,000295		
100,24	194,23	3857,4	40,60	4778							
	0,45	100,39	195,83	3876,9	39,60	4949					
		100,05	195,73	3859,1	39,80	4924					
		100,55	195,89	3910,5	40,00	4900	0,0020	0,0390	0,00002	0,00039	
		98,78	197,21	3911,8	39,80	4949	0,0015	0,0375	0,00002	0,00038	
		100,25	198,78	3938,7	40,30	4937	0,0020	0,0395	0,00002	0,00040	
	100,50	195,87	3850,3	40,10	4887						
	54%	0,55	100,10	196,50	3884,4	40,10	4887				
			100,71	194,45	3857,3	40,10	4837				
			100,52	197,26	3915,1	40,10	4912	0,0020	0,0345	0,00002	0,00035
			100,26	198,53	3948,0	40,30	4913	0,0010	0,0315	0,00001	0,00032
100,16			193,16	3847,9	39,50	4886	0,0020	0,0320	0,00002	0,00032	
100,15		197,59	3888,9	40,10	4937						
0,65		99,88	195,77	3866,4	41,10	4768					
		99,90	198,01	3863,2	41,00	4829					
		99,28	197,75	3905,5	41,20	4805	0,0025	0,0285	0,000025	0,000285	
		100,64	197,64	3875,4	41,80	4736	0,0020	0,0285	0,000020	0,000285	
	100,59	196,93	3890,5	41,30	4769	0,0015	0,0270	0,000015	0,000270		
99,45	196,40	3845,7	41,20	4757							

FOZ DO IGUAÇU-PR   28 DIAS										
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$
48%	0,45	99,84	196,47	3818,6	40,30	4863				
		99,80	195,41	3835,7	40,00	4875				
		99,84	194,53	3799,3	40,00	4875	0,0015	0,0375	0,000015	0,000375
		100,41	197,51	3840,2	40,70	4840	0,001	0,0385	0,00001	0,000385
		100,43	196,31	3812,5	40,60	4827	0,0005	0,0355	0,000005	0,000355
		100,09	196,90	3864,8	40,50	4864				
	0,55	100,19	193,68	3776,1	40,20	4825				
		99,63	197,84	3845,8	40,80	4852				
		100,35	196,00	3827,6	40,10	4887	0,0015	0,0325	0,000015	0,000325
		99,95	199,32	3918,1	40,70	4889	0,0015	0,033	0,000015	0,00033
		100,43	196,15	3811,4	40,20	4875	0,0015	0,034	0,000015	0,00034
		100,24	197,21	3860,0	40,70	4840				
0,65	100,30	193,83	3763,0	41,70	4652					
	100,16	200,32	3868,4	44,00	4545					
	100,04	194,95	3776,5	42,30	4609	0,0015	0,023	0,000015	0,00023	
	99,90	197,35	3844,9	43,30	4549	0,001	0,0225	0,00001	0,000225	
	100,28	199,77	3861,5	43,20	4629	0,002	0,0245	0,00002	0,000245	
	99,16	192,26	3723,6	41,60	4615					
42%	0,45	100,15	192,11	3720,9	39,20	4897				
		100,36	194,02	3741,2	40,10	4837				
		102,21	194,51	3765,5	40,60	4852	0,0015	0,037	0,000015	0,00037
		99,53	196,58	3806,3	41,00	4804	0,0015	0,038	0,000015	0,00038
		99,51	196,05	3793,5	40,60	4827	0,0015	0,0385	0,000015	0,000385
		99,86	195,54	3803,9	40,50	4814				
	0,55	100,77	195,34	3776,0	41,20	4733				
		99,44	194,71	3750,8	41,30	4648				
		100,43	191,95	3713,6	40,50	4740	0,002	0,033	0,00002	0,00033
		99,81	193,24	3719,0	40,60	4753	0,001	0,0305	0,00001	0,000305
		99,52	193,05	3741,6	40,50	4765	0,002	0,0335	0,00002	0,000335
		100,31	195,54	3782,5	41,00	4756				
0,65	100,23	201,31	3836,8	42,70	4685					
	101,36	197,58	3752,3	42,70	4613					
	100,27	195,25	3713,7	42,50	4588	0,0025	0,0275	0,000025	0,000275	
	99,44	199,07	3771,1	42,70	4543	0,002	0,028	0,00002	0,00028	
	99,53	194,28	3673,3	42,00	4619	0,002	0,0285	0,00002	0,000285	
	100,37	196,80	3750,3	42,80	4602					

TOLEDO-PR   28 DIAS											
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$	
60%	0,45	100,41	198,68	3983,5	41,50	4795					
		100,51	193,01	3859,6	39,90	4718					
		100,12	196,30	3929,5	41,80	4688	0,0035	0,0365	0,000035	0,000365	
		100,44	197,45	3932,9	41,50	4746	0,0025	0,0350	0,000025	0,000350	
		100,46	195,81	3916,4	41,70	4676	0,0030	0,0380	0,000030	0,000380	
	100,69	198,78	3970,8	42,10	4726						
	0,55	99,96	191,61	3852,5	40,80	4705					
		99,97	193,60	3874,8	40,10	4837					
		99,87	194,39	3877,0	41,90	4630	0,0030	0,0295	0,000030	0,000295	
		100,29	195,35	3929,0	41,90	4653	0,0020	0,0280	0,000020	0,000280	
99,86		192,18	3862,9	40,90	4694	0,0025	0,0270	0,000025	0,000270		
0,65	99,05	193,55	3886,5	41,60	4639						
	99,57	199,05	3971,9	42,60	4671						
	100,26	197,31	3917,6	42,20	4668						
	99,51	192,89	3851,6	41,30	4673	0,0025	0,0300	0,000025	0,000300		
	100,69	193,07	3846,7	40,80	4730	0,0020	0,0265	0,000020	0,000265		
54%	0,45	99,53	198,00	3910,4	42,60	4647	0,0025	0,0260	0,000025	0,000260	
		100,31	193,30	3837,3	41,20	4684					
		100,31	193,20	3846,5	39,60	4873					
		99,94	193,75	3870,6	39,50	4911					
		100,14	196,87	3950,9	41,60	4711	0,0030	0,0460	0,000030	0,000460	
	0,55	99,74	198,47	3938,1	42,70	4660	0,0045	0,0500	0,000045	0,000500	
		99,83	195,07	3869,1	41,30	4721	0,0035	0,0455	0,000035	0,000455	
		100,89	192,69	3831,9	39,90	4837					
		99,57	191,77	3797,4	39,40	4847					
		99,78	193,77	3842,5	39,90	4862					
0,65	99,08	199,18	3904,8	41,70	4772	0,0035	0,0430	0,000035	0,000430		
	99,54	196,85	3889,8	41,70	4724	0,0025	0,0405	0,000025	0,000405		
	100,19	194,52	3849,5	40,30	4813	0,0025	0,0395	0,000025	0,000395		
	99,78	197,94	3901,8	41,00	4804						
	100,54	198,62	3891,2	42,70	4660						
0,65	100,15	191,65	3762,7	40,00	4800						
	99,87	195,36	3833,5	41,30	4721	0,0030	0,0305	0,000030	0,000305		
	99,51	194,77	3829,6	41,80	4665	0,0025	0,0290	0,000025	0,000290		
	99,81	192,54	3830,1	40,50	4740	0,0030	0,0285	0,000030	0,000285		
	99,87	191,89	3782,6	40,50	4740						

TOLEDO-PR   28 DIAS											
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$	
48%	0,45	100,06	194,59	3740,3	40,80	4701					
		100,31	192,78	3756,5	40,30	4752					
		99,66	194,46	3781,0	40,90	4743	0,002	0,0455	0,00002	0,00046	
		100,06	196,44	3823,9	41,50	4722	0,002	0,044	0,00002	0,00044	
		100,20	198,17	3862,8	41,20	4805	0,002	0,044	0,00002	0,00044	
	100,64	196,85	3821,9	41,60	4782						
	0,55	99,95	192,62	3782,5	40,30	4735					
		100,11	193,29	3773,0	40,80	4740					
		99,91	195,87	3847,3	41,30	4745	0,0025	0,0385	2,5E-05	0,00039	
		100,09	192,24	3789,7	40,40	4777	0,002	0,0375	0,00002	0,00038	
100,79		193,55	3758,3	40,90	4718	0,002	0,039	0,00002	0,00039		
0,65	99,90	191,51	3745,5	40,20	4704						
	99,76	196,55	3832,7	41,50	4614						
	99,11	196,76	3815,0	41,60	4634						
	99,29	193,94	3737,4	42,20	4597	0,002	0,0365	0,00002	0,00037		
	99,55	195,52	3772,5	42,20	4620	0,002	0,036	0,00002	0,00036		
42%	0,45	100,77	193,59	3767,5	41,30	4697	0,002	0,0355	0,00002	0,00036	
		99,04	193,02	3702,8	41,20	4645					
		99,88	198,06	3828,2	41,40	4782					
		99,73	194,32	3780,0	40,70	4766					
		99,74	195,41	3802,3	40,40	4826	0,0025	0,041	2,5E-05	0,00041	
	0,55	100,26	192,35	3745,5	40,40	4826	0,0025	0,0425	2,5E-05	0,00043	
		99,97	193,43	3752,4	40,40	4777	0,002	0,0425	0,00002	0,00043	
		100,37	194,07	3758,8	40,40	4801					
		100,45	196,01	3735,9	42,30	4633					
		100,19	196,58	3743,0	42,30	4633					
0,65	100,08	195,86	3696,0	42,30	4633	0,0025	0,0375	2,5E-05	0,00038		
	99,66	195,90	3699,8	41,90	4677	0,002	0,037	0,00002	0,00037		
	100,22	198,97	3795,3	42,80	4649	0,002	0,0365	0,00002	0,00037		
	99,35	201,51	3811,7	43,30	4642						
	100,75	195,17	3710,7	42,90	4545						
0,65	101,03	195,81	3737,0	43,00	4558						
	99,40	198,49	3746,6	44,00	4522	0,0025	0,0335	2,5E-05	0,00034		
	100,24	196,71	3758,4	43,60	4495	0,002	0,032	0,00002	0,00032		
	99,91	195,83	3728,8	43,00	4558	0,002	0,0325	0,00002	0,00033		
		99,69	196,45	3749,1	43,40	4516					



GUARAPUAVA-PR   28 DIAS										
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$
		100,25	195,13	3947,1	39,70	4911				
		99,42	194,45	3936,4	38,40	5052				
	0,45	100,05	194,99	3918,0	38,60	5051	0,0025	0,0380	0,000025	0,000380
		100,14	193,95	3933,5	38,90	5012	0,0020	0,0335	0,000020	0,000335
		99,98	193,95	3921,5	39,00	4974	0,0020	0,0360	0,000020	0,000360
		99,92	197,74	4014,6	39,90	4962				
		100,45	192,83	3911,8	39,00	4948				
		100,38	192,99	3882,9	39,00	4948				
60%	0,55	100,00	193,96	3909,2	38,90	4961	0,0015	0,0280	0,000015	0,000280
		99,80	197,03	3968,6	39,50	4960	0,0015	0,0290	0,000015	0,000290
		100,14	194,99	3941,2	39,60	4974	0,0020	0,0280	0,000020	0,000280
		101,37	192,98	3901,7	39,20	4987				
		100,35	195,42	3936,9	40,20	4950				
		100,53	193,25	3900,1	39,00	4948				
	0,65	99,61	194,31	3884,4	39,00	4974	0,0015	0,0245	0,000015	0,000245
		99,74	197,27	3992,2	40,50	4864	0,0020	0,0290	0,000020	0,000290
		100,59	193,59	3888,0	39,00	4974	0,0015	0,0265	0,000015	0,000265
		99,98	192,86	3847,7	38,90	4961				
		100,36	195,83	3876,9	39,60	4990				
		100,30	195,71	3878,2	38,90	5013				
	0,45	100,50	197,65	3920,5	39,00	5000	0,0015	0,0375	0,000002	0,00038
		100,47	197,21	3912,9	39,20	4993	0,0020	0,0365	0,000002	0,00037
		100,34	198,87	3999,5	39,30	4968	0,0020	0,0375	0,000002	0,00038
		100,57	195,91	3860,3	39,70	4955				
		100,04	196,36	3884,5	39,60	4948,5				
		100,61	194,60	3856,4	39,90	4918,2				
54%	0,55	100,55	197,24	3916,2	39,10	4985,805	0,0015	0,0305	0,000002	0,00031
		100,21	199,53	3948,0	39,90	4948,44	0,0015	0,0315	0,000002	0,00032
		100,24	194,20	3847,9	39,50	4986,245	0,0020	0,0310	0,000002	0,00031
		100,39	197,51	3899,9	39,70	4961,94				
		99,54	195,66	3826,4	40,60	4707,38				
		99,58	197,87	3852,1	39,60	4705				
	0,65	100,28	195,64	3885,6	40,10	4691,78	0,0015	0,0285	0,000015	0,000285
		100,57	197,40	3882,3	40,50	4640,92	0,002	0,0295	0,000020	0,000295
		100,84	197,28	3910,3	39,30	4728,58	0,0015	0,0275	0,000015	0,000275
		99,89	196,38	3845,7	39,90	4695,86				

GUARAPUAVA-PR   28 DIAS											
$\beta$	a/c	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$	
		99,73	196,75	3754,9	39,60	4949					
		100,46	196,53	3813,9	39,40	4974					
	0,45		99,87	194,87	3773,9	39,40	4949	0,0005	0,0375	0,00002	0,00046
			99,96	197,00	3843,5	39,60	4974	0,002	0,0395	0,00002	0,00044
			99,25	197,85	3848,3	39,70	4962	0,002	0,0385	0,00002	0,00044
			99,94	195,97	3795,9	39,60	4949				
			100,16	197,68	3854,7	40,20	4900				
	48%	0,55	100,10	197,67	3875,6	40,80	4840				
			99,91	195,23	3801,0	39,30	4961	0,002	0,033	2,5E-05	0,00039
			99,85	196,93	3836,1	40,30	4888	0,0015	0,034	0,00002	0,00038
		99,80	194,79	3798,7	39,40	4949	0,002	0,0335	0,00002	0,00039	
		99,85	196,78	3841,9	40,30	4888					
0,65			99,67	199,01	3845,5	41,00	4853				
			99,14	194,83	3770,0	40,30	4850				
			100,07	197,61	3782,5	41,20	4793	0,002	0,032	0,00002	0,00037
			100,47	195,38	3755,3	40,60	4802	0,0015	0,03	0,00002	0,00036
			100,53	193,67	3734,2	39,60	4873	0,001	0,029	0,00002	0,00036
		99,78	197,47	3794,1	40,90	4816					
		100,14	193,22	3705,8	40,30	4745					
	0,45		100,41	194,00	3711,3	40,10	4751				
			99,44	194,81	3754,5	40,00	4762	0,0015	0,035	2,5E-05	0,00041
			100,34	196,58	3804,1	40,20	4786	0,0015	0,035	2,5E-05	0,00043
			99,58	198,70	3793,1	40,30	4740	0,0015	0,032	0,00002	0,00043
			100,42	196,28	3802,8	40,10	4761				
	42%	0,55	100,32	191,95	3756,0	40,90	4705				
			100,43	194,72	3750,2	41,30	4682				
			100,14	192,06	3703,6	40,40	4759	0,0015	0,0285	2,5E-05	0,00038
		99,19	193,72	3639,0	41,00	4700	0,001	0,03	0,00002	0,00037	
		99,92	193,05	3742,7	40,70	4726	0,0015	0,029	0,00002	0,00037	
0,65			100,87	198,54	3842,5	41,20	4650				
			99,54	199,77	3816,8	41,40	4641				
			100,49	197,58	3782,2	40,90	4667				
			99,44	199,33	3773,7	41,30	4621	0,002	0,031	2,5E-05	0,00034
			100,38	199,07	3784,2	41,30	4594	0,0015	0,0295	0,00002	0,00032
	100,19	194,28	3753,3	41,10	4637	0,002	0,0295	0,00002	0,00033		
	99,85	196,80	3750,3	41,00	4620						

TOLEDO – PR | 1, 3, 7, 28 E 91 DIAS |  $\beta = 48\%$  |  $a/c = 0,65$ 

Tempo	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Massa (g)	Tempo ( $\mu$ s)	V (m/s)	Desloc. 0,5 MPa (mm)	Desloc. 30%.fc (mm)	$\epsilon_a$	$\epsilon_b$
1 dia	99,48	195,02	3752,4	51,80	3764				
	100,05	197,74	3811,3	53,20	3721				
	99,00	193,06	3723,7	51,70	3733	0,0045	0,0170	0,000045	0,000170
	100,14	196,03	3759,4	51,70	3791	0,0035	0,0160	0,000035	0,000160
	99,71	193,63	3746,6	51,60	3817	0,0040	0,0155	0,000040	0,000155
3 dias	99,48	192,69	3690,8	45,00	4288				
	100,13	196,14	3812,9	45,00	4355				
	101,78	197,15	3787,7	45,70	4310	0,0030	0,0225	0,000030	0,000225
	99,97	199,94	3865,0	46,50	4301	0,0025	0,0225	0,000025	0,000225
	100,08	194,86	3781,7	45,30	4304	0,0030	0,0240	0,000030	0,000240
7 dias	99,43	195,32	3778,6	43,90	4441				
	99,71	199,11	3858,3	45,00	4422				
	101,26	194,86	3798,0	44,20	4502	0,0025	0,0265	0,000025	0,000265
	100,05	194,06	3753,3	43,40	4470	0,0030	0,0280	0,000030	0,000280
28 dias	99,31	197,02	3799,2	44,40	4436				
	100,14	197,04	3811,5	43,80	4497			0,0025	
	99,98	194,30	3776,0	43,00	4511				
	100,21	194,54	3765,5	43,40	4470	0,0025	0,0320	0,00003	0,00032
	98,95	194,34	3740,3	43,00	4534	0,0025	0,0315	0,00003	0,00032
91 dias	100,15	195,21	3772,3	43,30	4503				
	100,65	198,36	3815,2	45,90	4635			0,0020	
	100,02	189,56	3716,3	43,10	4608				
	100,07	197,49	3829,7	45,60	4542	0,0015	0,0290	0,00002	0,00029
	100,58	197,43	3814,4	44,80	4604	0,0015	0,0310	0,00002	0,00031

# **APÊNDICE C**

Resultados da Densidade, Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico e Resistência à Compressão do Concreto

FOZ DO IGUAÇU-PR   7 DIAS								
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)	
60%	0,45	2,58	46,03	55,36	47,35	48,73		
		2,54	42,94	53,32	46,77	47,80		
		2,55	44,17	55,68	47,06	48,61	40,78	
		2,62	45,49	55,01	46,81	48,92	43,54	
		2,57	41,61	52,98	46,83	47,46	41,43	
		2,55		55,07	47,09	47,20		
	0,55	2,50	36,96	48,73	43,18	43,58		
		2,53	39,09	52,51	44,29	44,56		
		2,55	38,99	54,12	44,55	45,67	38,95	
		2,55	36,71	52,37	44,80	45,56	38,95	
		2,54	35,46	52,05	44,16	43,66	41,95	
		2,56		54,37	45,84	46,53		
		0,65	2,50	32,38	48,45	42,31	42,88	
			2,53	32,46	52,38	43,64	44,47	
			2,53	33,75	50,27	43,37	43,75	36,90
			2,53	30,32	50,39	42,38	42,87	32,95
			2,56	33,13	53,10	45,00	46,04	34,81
			2,55		52,00	42,80	43,64	
54%	0,45	2,53	44,34	51,96	44,96	45,47		
		2,53	44,27	51,01	44,50	45,01		
		2,52	39,95	52,55	43,61	44,32	34,57	
		2,50	44,22	51,78	44,70	44,20	37,62	
		2,51	44,99	51,11	44,62	45,47	41,27	
		2,50		52,38	44,83	44,88		
	0,55	2,51	38,49	51,73	44,72	44,74		
		2,55	37,74	51,68	44,49	44,92		
		2,52	37,22	51,48	44,17	43,64	36,45	
		2,52	38,38	51,56	45,20	45,82	38,37	
		2,52	38,59	50,41	44,53	44,42	38,37	
		2,55		52,72	44,59	44,61		
		0,65	2,49	27,54	47,94	40,96	40,61	
			2,49	26,61	48,45	41,18	40,78	
			2,53	26,38	48,73	41,40	41,51	33,14
			2,51	27,82	50,39	41,34	40,62	34,65
			2,52	27,95	47,91	41,56	41,52	34,65
			2,49		48,26	40,49	39,89	

FOZ DO IGUAÇU-PR   7 DIAS								
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)	
48%	0,45	2,43	43,67	51,66	44,30	44,28		
		2,44	43,23	52,03	44,34	44,30		
		2,43	41,91	51,07	45,12	46,74	40,43	
		2,47	38,50	49,34	42,53	42,44	40,43	
		2,44	43,55	49,10	43,91	44,02	37,42	
		2,51		52,84	44,80	45,09		
	0,55	2,49	38,46	50,03	42,89	43,83		
		2,47	38,38	47,47	41,22	39,53		
		2,51	35,19	47,69	41,94	40,66	36,15	
		2,47	37,04	50,67	43,48	44,00	36,75	
		2,49	36,83	51,94	43,62	44,71	36,75	
		2,50		48,45	42,61	43,36		
	0,65	2,44	21,15	43,58	35,27	34,83		
		2,47	21,07	44,18	36,67	35,90		
		2,44	21,44	44,10	36,20	36,07	29,16	
		2,47	21,21	43,09	36,08	35,62	28,45	
		2,43	20,78	44,05	36,54	35,46	28,45	
		2,49		45,30	37,96	37,41		
	42%	0,45	2,47	40,54	50,56	43,09	42,96	
			2,45	41,25	51,15	43,37	43,04	
			2,50	39,85	51,64	44,11	44,09	37,96
			2,42	40,31	49,12	41,35	40,35	36,78
			2,44	39,65	50,54	42,26	41,63	37,96
			2,43		49,27	42,09	41,53	
0,55		2,48	33,48	49,63	41,81	42,36		
		2,36	33,88	47,23	40,41	39,88		
		2,48	33,61	48,17	41,91	42,49	34,92	
		2,44	33,38	48,11	41,31	40,70	35,57	
		2,45	32,97	48,93	41,67	41,80	35,57	
		2,45		49,19	41,15	41,58		
0,65	2,41	25,83	45,95	38,78	39,01			
	2,41	26,88	45,22	39,11	37,87			
	2,41	28,62	46,17	38,96	38,45	32,92		
	2,44	26,75	45,31	39,16	39,60	33,67		
	2,40	26,30	44,95	39,11	39,03	34,45		
	2,41		44,33	38,91	38,90			

FOZ DO IGUAÇU-PR   28 DIAS							
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
60%	0,45	2,60	56,15	57,62	49,62	49,41	
		2,56	57,89	57,19	49,22	49,36	
		2,57	55,24	56,43	49,61	49,82	43,13
		2,56	56,33	56,98	49,02	49,50	44,28
		2,55	58,09	56,81	49,19	49,54	44,88
		2,56		56,76	49,10	49,86	
	0,55	2,55	52,21	54,21	47,21	47,16	
		2,55	46,96	54,61	47,52	48,20	
		2,52	45,26	54,98	46,64	46,24	41,07
		2,55	50,26	54,29	47,94	48,85	41,67
		2,60	47,71	55,94	48,52	50,25	42,28
		2,52		54,27	47,53	48,01	
	0,65	2,54	39,82	53,71	45,82	46,26	
		2,56	38,31	55,04	45,94	46,68	
		2,55	40,21	55,02	46,00	46,33	39,37
		2,54	40,21	53,61	46,07	46,91	42,34
		2,53	39,23	52,18	44,96	44,61	40,80
		2,52		51,71	45,00	44,43	
54%	0,45	2,50	56,15	55,14	46,76	46,66	
		2,51	53,45	54,72	46,96	47,55	
		2,51	55,79	54,32	47,80	47,83	43,08
		2,59	55,89	57,05	49,09	50,57	44,28
		2,51	56,20	55,06	46,86	47,76	42,51
		2,48		53,27	46,00	46,18	
	0,55	2,51	43,16	54,00	46,77	47,28	
		2,49	47,39	52,44	46,52	45,92	
		2,50	45,41	54,31	46,12	46,60	40,26
		2,52	46,76	54,72	46,79	46,72	42,90
		2,53	46,53	54,32	47,45	47,98	43,61
		2,50		54,81	46,02	46,45	
	0,65	2,52	34,10	51,57	43,40	43,25	
		2,49	33,91	52,24	42,89	42,60	
		2,55	35,13	53,02	43,89	43,50	37,31
		2,46	35,93	49,76	41,18	40,62	36,61
		2,49	34,93	50,89	42,95	43,51	38,04
		2,52		51,34	42,56	42,50	

FOZ DO IGUAÇU-PR   28 DIAS							
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
48%	0,45	2,48	49,90	52,84	46,51	46,76	
		2,51	52,81	53,67	47,15	47,46	
		2,49	51,14	53,36	46,17	46,50	41,41
		2,46	48,13	51,77	45,32	44,25	39,75
		2,45	51,64	51,41	45,97	45,89	42,59
		2,49		53,12	46,47	46,15	
	0,55	2,47	42,16	51,82	44,91	45,47	
		2,49	46,82	52,84	45,57	46,08	
		2,47	44,34	53,07	45,59	44,17	41,44
		2,51	46,72	53,90	46,38	46,16	40,78
		2,45	47,03	52,46	45,14	44,95	39,53
		2,48		52,29	45,77	46,31	
	0,65	2,46	26,77	47,86	39,67	40,43	
		2,45	25,89	45,56	38,98	39,61	
		2,46	27,94	47,12	39,34	39,18	34,41
		2,49	27,91	46,30	40,19	39,15	34,41
		2,45	26,16	47,20	38,67	38,44	32,88
		2,51		48,07	41,31	42,72	
42%	0,45	2,46	50,84	53,07	44,92	44,54	
		2,44	48,65	51,33	44,51	44,58	
		2,36	47,29	49,99	43,69	43,68	40,63
		2,49	50,49	51,69	45,52	45,28	39,52
		2,49	50,42	52,17	45,47	44,56	38,98
		2,48		51,80	45,67	45,46	
	0,55	2,42	39,81	48,87	42,50	41,90	
		2,48	43,37	48,23	43,48	43,27	
		2,44	41,39	49,39	43,27	43,97	38,64
		2,46	41,55	50,01	44,05	44,66	40,60
		2,49	42,37	50,91	44,60	45,29	38,02
		2,45		49,83	43,88	42,79	
	0,65	2,42	32,57	47,72	41,99	41,37	
		2,35	31,49	45,08	39,19	37,72	
		2,41	31,88	45,64	40,93	40,50	36,43
		2,44	33,76	45,31	41,19	41,57	35,03
		2,43	33,15	46,67	41,44	41,70	34,37
		2,41		45,90	40,56	39,93	



TOLEDO-PR   28 DIAS								
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)	
60%	0,45	2,53	35,57	52,39	42,75	42,86		
		2,52	40,47	50,49	42,89	42,88		
		2,54	38,15	50,29	43,00	43,62	33,05	
		2,51	38,64	50,96	42,72	42,86	33,56	
		2,52	35,91	49,66	42,15	44,00	31,16	
		2,51		50,43	41,97	42,10		
	0,55	2,56	24,31	51,04	41,71	42,52		
		2,55	31,73	53,70	43,31	44,46		
		2,55	26,99	49,12	40,76	41,29	29,83	
		2,55	28,04	49,61	42,62	42,67	30,41	
		2,57	24,39	50,89	41,54	41,90	32,27	
		2,61		50,47	41,98	44,91		
	0,65	2,56	27,92	50,32	40,69	42,71		
		2,51	27,91	49,32	40,28	41,27		
		2,57	26,95	50,46	41,14	41,94	28,63	
		2,50	31,78	50,38	42,14	43,31	32,14	
		2,54	33,03	49,34	41,69	42,53	33,51	
		2,51		49,60	40,46	40,96		
	54%	0,45	2,52	44,98	53,84	44,84	44,92	
			2,55	44,62	55,28	46,08	45,56	
			2,55	31,10	50,90	43,37	45,85	30,09
			2,54	30,35	49,63	41,53	42,54	28,44
			2,53	40,41	50,83	43,63	44,13	30,81
			2,49		52,38	43,16	43,74	
0,55		2,54	43,55	53,77	45,09	45,29		
		2,54	40,63	53,95	44,87	44,75		
		2,54	34,60	52,11	42,02	41,70	30,70	
		2,54	32,25	51,00	42,41	43,75	31,91	
		2,51	41,55	52,34	43,35	43,78	32,78	
		2,52		52,36	42,39	42,43		
0,65		2,47	26,92	48,23	39,71	40,62		
		2,49	31,44	51,68	41,60	41,34		
		2,51	29,53	50,25	40,30	39,52	30,02	
		2,53	26,83	49,52	40,94	41,83	31,15	
		2,54	32,17	51,41	42,69	43,55	32,37	
		2,52		50,88	42,08	43,18		

TOLEDO-PR   28 DIAS							
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
48%	0,45	2,44	54,17	48,61	42,85	42,99	
		2,47	53,86	50,11	44,23	44,08	
		2,49	50,44	50,46	45,00	45,76	36,10
		2,48	53,03	49,68	44,53	45,33	37,39
		2,47	53,25	51,36	44,77	45,03	37,39
		2,44		50,23	44,13	44,93	
	0,55	2,50	44,36	50,50	44,36	43,77	
		2,48	42,98	50,15	44,02	44,76	
		2,51	43,50	50,77	44,64	45,71	35,00
		2,51	43,15	51,45	44,62	44,55	35,49
		2,43	44,64	48,76	41,65	40,26	34,05
		2,50		49,69	43,87	44,77	
	0,65	2,49	39,58	47,80	41,79	41,98	
		2,51	38,48	48,57	42,82	42,76	
		2,49	37,23	47,33	40,55	40,52	32,49
		2,48	36,92	47,62	41,30	41,30	32,97
		2,44	37,58	48,45	41,06	40,23	33,46
		2,49		48,36	42,20	43,09	
42%	0,45	2,47	48,80	50,77	44,41	44,79	
		2,49	51,80	50,91	44,93	44,80	
		2,49	50,37	52,20	45,20	45,97	37,90
		2,47	52,28	51,70	45,43	45,13	36,48
		2,47	53,82	50,76	45,53	44,77	36,03
		2,45		50,78	43,81	43,48	
	0,55	2,41	42,77	46,46	42,03	41,30	
		2,41	40,74	46,65	41,70	42,08	
		2,40	39,60	46,34	41,17	40,57	34,36
		2,42	42,28	47,66	41,90	41,60	34,36
		2,42	41,25	47,04	42,35	42,60	34,86
		2,44		47,32	42,38	42,10	
	0,65	2,38	34,32	44,34	39,19	38,06	
		2,38	34,38	44,51	39,83	39,92	
		2,43	34,69	44,77	39,43	39,49	31,63
		2,42	35,70	44,02	40,17	40,34	32,68
		2,43	35,12	45,41	41,03	40,90	32,14
		2,45		44,88	40,64	41,16	

GUARAPUAVA-PR   28 DIAS								
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)	
60%	0,45	2,56	45,95	55,62	46,77	48,97		
		2,61	49,26	59,89	48,68	48,94		
		2,56	37,37	58,69	49,43	49,48	38,82	
		2,58	42,02	58,22	48,53	49,09	43,75	
		2,58	39,40	57,35	49,23	51,03	40,53	
		2,59		57,37	49,15	50,13		
	0,55	2,56	35,53	56,40	48,15	48,85		
		2,54	38,89	56,02	47,97	47,45		
		2,57	39,86	56,84	48,82	48,45	40,24	
		2,57	34,56	57,01	47,61	47,96	38,77	
		2,57	35,48	57,14	48,05	48,95	41,01	
		2,51		56,07	47,16	47,51		
	0,65	2,55	34,17	56,17	46,87	46,94		
		2,54	34,45	56,03	46,51	46,82		
		2,57	39,89	57,12	48,13	48,57	42,58	
		2,59	24,16	55,15	46,23	47,55	36,27	
		2,53	33,77	56,28	46,35	46,75	39,17	
		2,54		56,29	47,59	48,42		
	54%	0,45	2,50	48,63	56,08	47,12	47,76	
			2,51	47,23	56,73	46,89	47,34	
			2,50	45,42	56,26	46,98	46,99	38,55
			2,50	46,60	56,15	46,80	47,01	40,23
			2,54	45,47	56,49	47,76	47,78	39,10
			2,48		54,81	47,23	48,18	
0,55		2,52	40,75	55,47	46,68	47,28		
		2,49	41,39	54,26	46,45	46,03		
		2,50	43,00	55,94	46,67	46,54	40,76	
		2,51	40,03	55,28	46,54	46,93	39,40	
		2,51	40,22	56,18	46,56	46,78	40,76	
		2,49		55,28	46,99	47,45		
0,65		2,51	35,81	50,12	43,40	44,04		
		2,50	36,44	49,81	43,02	43,08		
		2,51	36,88	49,82	43,57	43,89	38,29	
		2,48	34,29	47,99	42,58	42,62	37,59	
		2,48	36,28	49,94	42,99	43,90	39,76	
		2,50		49,59	43,01	42,78		

GUARAPUAVA-PR   28 DIAS								
$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)	
48%	0,45	2,44	51,30	53,86	46,65	46,27		
		2,45	53,09	54,52	46,27	45,92		
		2,47	47,47	54,50	47,25	46,86	40,97	
		2,49	51,19	55,36	47,90	48,28	40,42	
		2,51	51,54	55,71	49,15	48,02	41,53	
		2,47		54,43	47,43	47,80		
	0,55	2,47	45,97	53,48	46,97	46,56		
		2,49	43,88	52,53	48,00	48,07		
		2,48	46,14	55,00	47,42	46,53	41,86	
		2,49	43,51	53,49	47,00	47,64	39,93	
		2,49	44,96	54,95	47,18	47,00	41,20	
		2,49		53,61	47,76	47,13		
	0,65	2,48	37,45	52,50	45,64	46,91		
		2,51	38,43	53,07	46,35	45,89		
		2,43	38,32	50,32	43,82	42,9	36,27	
		2,42	37,69	50,31	43,89	44,41	38,18	
		2,43	38,78	51,91	45,13	43,49	38,86	
		2,46		51,30	44,71	44,02		
	42%	0,45	2,44	42,13	49,35	43,42	43,53	
			2,42	43,12	49,08	43,23	43,58	
			2,48	40,77	50,63	44,27	44,32	36,68
			2,45	42,56	50,46	43,78	43,28	36,68
			2,45	43,16	49,57	43,77	43,89	40,28
			2,45		49,91	43,53	43,78	
0,55		2,48	36,79	49,32	43,89	44,98		
		2,43	36,03	47,96	43,43	43,27		
		2,45	37,60	49,90	42,67	42,97	38,61	
		2,43	35,38	48,33	42,75	42,66	35,95	
		2,47	36,17	49,69	42,45	42,89	37,91	
		2,42		47,12	43,26	43,79		
0,65		2,46	35,28	47,59	40,78	40,45		
		2,41	35,41	47,32	40,59	40,78		
		2,44	35,37	46,86	40,89	41,06	34,84	
		2,40	35,12	45,62	40,79	41,00	36,09	
		2,45	35,68	47,42	41,22	41,65	36,74	
		2,43		46,75	40,23	40,56		

TOLEDO – PR   1, 3, 7, 28 E 91 DIAS   $\beta = 48\%$   $a/c = 0,65$						
Tempo	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
1 dia	2,48	9,41	31,57	9,20	23,55	
	2,45	9,74	30,55	8,90	23,16	
	2,51	10,02	31,43	9,34	24,17	18,99
	2,44	9,83	31,50	9,18	23,97	18,99
	2,48	10,85	32,49	9,86	25,60	20,64
3 dias	2,46	18,76	40,78	33,89	31,90	
	2,47	19,54	42,14	34,71	34,50	
	2,36	19,46	39,48	33,49	30,29	26,90
	2,46	19,82	41,00	34,13	34,28	26,22
	2,47	19,84	41,13	34,95	30,38	24,98
7 dias	2,49	25,79	44,22	38,13	38,71	
	2,48	23,83	43,68	37,08	36,60	
	2,42	24,22	44,15	36,05	36,01	28,93
	2,46	24,28	44,24	37,54	37,23	27,77
	2,49	24,84	44,09	37,43	37,21	28,93
28 dias	2,46	31,71	44,70	39,58	39,01	
	2,48	30,79	45,34	39,82	39,29	
	2,45	28,88	44,13	39,00	38,42	30,08
	2,50	29,97	46,30	39,75	39,07	30,60
	2,45	29,74	44,77	39,31	39,30	30,08
91 dias	2,42	36,68	46,74	40,37	40,22	
	2,50	33,44	47,68	42,08	42,52	
	2,47	36,93	45,78	41,50	40,80	36,43
	2,43	38,24	46,39	40,01	40,58	33,96
	2,47	37,18	46,55	41,13	40,51	35,78

## VALORES MÉDIOS

TOLEDO – PR   1, 3, 7, 28 E 91 DIAS   $\beta = 48\%$   $a/c = 0,65$						
Tempo	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
1 dia	2,47	9,97	31,51	9,30	24,09	19,54
3 dias	2,44	19,48	40,91	34,23	32,27	26,03
7 dias	2,47	24,59	44,07	37,25	37,15	28,54
28 dias	2,47	30,22	45,05	39,49	39,02	30,25
91 dias	2,46	36,49	46,37	41,02	40,93	35,39

## VALORES MÉDIOS

## FOZ DO IGUAÇU-PR | 7 DIAS

$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
60%	0,45	2,57	44,05	54,57	46,99	48,12	41,92
	0,55	2,54	37,44	52,36	44,47	44,93	39,95
	0,65	2,53	32,41	51,10	43,25	43,94	34,89
54%	0,45	2,51	43,56	51,80	44,54	44,89	37,82
	0,55	2,49	37,18	49,38	42,63	42,68	36,55
	0,65	2,51	27,26	48,61	41,16	40,82	34,15
48%	0,45	2,45	42,17	51,01	44,17	44,48	39,43
	0,55	2,49	37,18	49,38	42,63	42,68	36,55
	0,65	2,46	21,13	44,05	36,45	35,88	28,68
42%	0,45	2,45	40,32	50,38	42,71	42,27	37,57
	0,55	2,45	33,46	48,55	41,38	41,47	35,35
	0,65	2,41	26,88	45,32	39,01	38,81	33,68

## VALORES MÉDIOS

## FOZ DO IGUAÇU-PR | 28 DIAS

$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VPU}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
60%	0,45	2,57	56,74	56,97	49,29	49,58	44,10
	0,55	2,55	48,48	54,72	47,56	48,12	41,67
	0,65	2,54	39,56	53,55	45,63	45,87	40,83
54%	0,45	2,52	55,50	54,93	47,25	47,76	43,29
	0,55	2,48	45,41	52,73	45,56	45,52	42,25
	0,65	2,51	34,80	51,47	42,81	42,66	37,32
48%	0,45	2,48	50,72	52,70	46,27	46,17	37,32
	0,55	2,48	45,41	52,73	45,56	45,52	40,59
	0,65	2,47	26,93	47,02	39,69	39,92	33,90
42%	0,45	2,45	49,54	51,68	44,96	44,68	39,71
	0,55	2,46	41,70	49,54	43,63	43,65	39,09
	0,65	2,41	32,57	46,05	40,88	40,47	35,28

## VALORES MÉDIOS

## TOLEDO-PR | 28 DIAS

60%	0,45	2,52	37,75	50,70	42,58	43,05	32,59
	0,55	2,56	27,09	50,81	41,99	42,96	30,84
	0,65	2,53	29,52	49,90	41,07	42,12	31,43
54%	0,45	2,53	38,29	52,14	43,77	44,46	29,78
	0,55	2,49	43,73	50,22	43,86	43,97	31,80
	0,65	2,51	29,38	50,33	41,22	41,67	31,18
48%	0,45	2,47	52,95	50,08	44,25	44,69	36,96
	0,55	2,49	43,73	50,22	43,86	43,97	34,85
	0,65	2,48	37,96	48,02	41,62	41,65	32,97
42%	0,45	2,47	51,42	51,19	44,89	44,82	36,80
	0,55	2,42	41,33	46,91	41,92	41,71	34,53
	0,65	2,42	34,84	44,65	40,05	39,98	32,15

## VALORES MÉDIOS

## GUARAPUAVA-PR | 28 DIAS

$\beta$	a/c	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$f_c$ (MPa)	$E_{d,VP}$ (GPa)	$E_{d,TEI Long.}$ (GPa)	$E_{d,TEI Flex.}$ (GPa)	$E_c$ (GPa)
60%	0,45	2,58	42,80	57,86	48,63	49,61	41,03
	0,55	2,55	36,86	56,58	47,96	48,20	40,01
	0,65	2,55	33,29	56,17	46,95	47,51	39,34
54%	0,45	2,51	46,67	56,09	47,13	47,51	39,29
	0,55	2,49	44,89	53,84	47,39	47,16	40,31
	0,65	2,50	35,94	49,55	43,10	43,39	38,55
48%	0,45	2,47	50,92	54,73	47,44	47,19	40,97
	0,55	2,49	44,89	53,84	47,39	47,16	41,00
	0,65	2,45	38,13	51,57	44,92	44,60	37,77
42%	0,45	2,45	42,35	49,83	43,67	43,73	37,88
	0,55	2,45	36,40	48,72	43,08	43,43	37,49
	0,65	2,43	35,37	46,93	40,75	40,92	35,89