

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARCOS VINÍCIO DE CAMARGO

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E
MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO ATRAVÉS
DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

MARINGÁ
2020

MARCOS VINÍCIO DE CAMARGO

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE
ELASTICIDADE DO CONCRETO ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO
DESTRUTIVOS (END)**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari

MARINGÁ
2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

C172e

Camargo , Marcos Vinício de

Estimativa da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto através de ensaios não destrutivos (END) / Marcos Vinício de Camargo . -- Maringá, PR, 2020.
142 f.: il. color., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Vladimir José Ferrari.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

1. Ensaio não destrutivo . 2. SonReb. 3. Correlação múltipla . 4. Concreto . 5. Módulo de elasticidade. I. Ferrari, Vladimir José , orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.1834

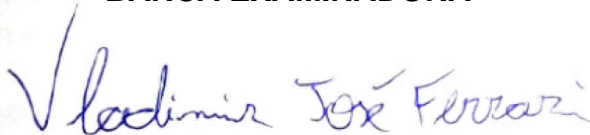
MARCOS VINÍCIO DE CAMARGO

**ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO
DE ELASTICIDADE DO CONCRETO ATRAVÉS DE
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)**

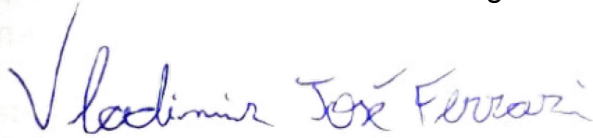
Dissertação apresentada à Universidade
Estadual de Maringá, como requisito parcial para
a obtenção do título de mestre.

Aprovado em: 01/06/2020

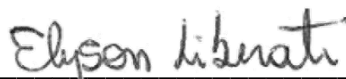
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari
Universidade Estadual de Maringá

p/ 

Profa. Dra. Berenice Martins Toralles Carbonari
Universidade Estadual de Londrina



Prof. Dr. Elison Andrew Pozo Liberati
Universidade Estadual de Maringá

A Deus pela condução em minha vida,
à minha família,
especialmente a minha esposa Laisa e minha filha Maria Fernanda
que são exemplos de dedicação e alegria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proteger e guiar sempre.

A minha esposa Laisa Rebeca do Vale Barcarolo, que me acompanhou nesta jornada, sempre me incentivando e mostrando que as dificuldades sempre podem ser superadas.

A minha filha Maria Fernanda Barcarolo Camargo que me mostrou o verdadeiro significado da vida.

Aos meus pais Marcos e Cleusa (in memoriam) e irmã Bruna, por serem exemplos e me guiarem com sabedoria em todas as etapas de minha vida

Ao meu orientador Prof. Dr. Vladimir José Ferrari por me orientar ao longo deste trabalho, contribuindo diretamente para meu crescimento científico.

A Prof^ª. Dr^ª. Berenice Martins Toralles que contribuiu com o equipamento de ultrassom utilizado na pesquisa.

Ao professor Dr. José Wilson Assunção pelo auxílio durante a realização do programa experimental.

Ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil – PCV - por proporcionar meus estudos de mestrado e aos professores pelas aulas ministradas.

Aos funcionários do laboratório de materiais de construção civil da UEM.

A Francieli Stefani Cofani Pinto, que me auxiliou na realização dos ensaios de ultrassom.

À UniFil (Centro Universitário Filadélfia) por disponibilizar o laboratório do curso de Engenharia Civil durante a elaboração dos corpos de prova em especial ao técnico Augusto César Pereira Góis pela solicitude.

RESUMO

Cada vez mais a estimativa dos parâmetros de resistência à compressão ou módulo de Elasticidade de estruturas em concreto armado tanto para estruturas existentes ou em fase de construção se faz necessário. Neste contexto a estimativa destes parâmetros utilizando métodos de ensaios não destrutivos (ENDs) surgem como uma alternativa cada vez mais viável, uma vez que apresentam respostas rápidas sem causar danos a estrutura. Dessa maneira a pesquisa tem como objetivo apresentar a estimativa dos parâmetros resistência à compressão e módulo de Elasticidade por meio de curvas de correlação simples e combinada através da técnica SonReb conforme indica a Rilem (1993) para concretos com resistência nominal entre 20 e 50 MPa. Para a elaboração das curvas são utilizados três métodos não destrutivos, dentre eles, o ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU), índice esclerométrico (IE) e o módulo de Elasticidade dinâmico (E_d), obtido a partir do ensaio de resposta acústica (RA), para a estimativa da Resistência à compressão e módulo de Elasticidade do concreto. Estes parâmetros foram estimados por meio de curvas de correlação simples e curvas de Iso-resistência obtidas a partir da combinação dos ENDs conforme a metodologia SonReb. Para tanto foram moldados corpos de prova cilíndricos (150 x 300) mm a partir da elaboração de cinco diferentes concretos com resistência nominal em um intervalo de 20 a 50 MPa, analisando a resistência ao longo das idades de 14,28 e 56 dias. Os corpos de prova foram submetidos aos ENDs nas referidas idades, em concomitância realizou-se os ensaios destrutivos de resistência à compressão axial (f_c) e módulo de Elasticidade estático (E_c). A partir dos resultados encontrados no programa experimental foram realizados estudos de correlação através de diferentes equações de curvas. Dentre as correlações, para estimativa da resistência à compressão, a correlação $f_c \times IE$ apresentou melhor resultado $R^2=0,906$, sendo este mesmo valor próximo do encontrado por meio da correlação múltipla $VPU \times IE \times f_c$, $R^2=0,901$. Já o estudo realizado através do módulo de Elasticidade, os resultados apresentaram a influência da resistência à compressão do concreto no módulo dinâmico. Como conclusão a pesquisa demonstrou a importância da elaboração de curvas de correlação simples e combinada a partir de ENDs para a estimar os parâmetros de resistência à compressão e módulo de Elasticidade do concreto.

Palavras chave: ensaios não-destrutivos, SonReb, correlação múltipla, concreto, módulo de Elasticidade.

ABSTRACT

Increasingly, it is necessary to estimate the parameters of compressive strength or elasticity module of reinforced concrete structures for existing structures or under construction. In this context, the estimation of these parameters using non-destructive test methods (NTDs) appears as an increasingly viable alternative, since they present rapid responses without causing damage to the structure. In this way, the research aims to present the estimated parameters of compressive strength and modulus of elasticity through simple and combined correlation curves using the SonReb technique as indicated by Rilem (1993) for concretes with nominal strength between 20 and 50 MPa. For the preparation of the curves, three non-destructive methods are used, among them, the Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), Rebound Number (RN) and the dynamic elasticity modulus (E_d) obtained from the Acoustic Response test (RA), to estimate the compressive strength and elasticity modulus of the concrete. These parameters were estimated by means of simple correlation curves and Iso-resistance curves obtained from the combination of NTDs according to the SonReb methodology. For this purpose, cylindrical specimens (150 x 300) mm were molded from the elaboration of five different concretes with nominal strength in an interval of 20 to 50 MPa, analyzing the strength over the ages of 14, 28 and 56 days. The specimens were submitted to the NTDs at the aforementioned ages, concomitantly, destructive tests of axial compression resistance (f_c) and static Elasticity module (E_c) were performed. From the results found in the experimental program, correlation studies were carried out using different curve equations. Among the correlations, to estimate the compressive strength, the correlation RN x f_c presented the best result $R^2 = 0.906$, this same value being found for the multiple correlation UPV x RN x f_c , $R^2 = 0.901$. As for the study carried out through the Elasticity module, the results showed the influence of the compressive strength of concrete in the dynamic module. As a conclusion, the research demonstrated the importance of developing simple and combined correlation curves from NTDs to estimate the parameters of compressive strength and Elasticity module of concrete.

Keywords: non-destructive test, SonReb, multiple correlation, concrete, elastic modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curvas tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e do concreto.....	21
Figura 2.2 - Comportamento da curva tensão-deformação do concreto.....	22
Figura 2.3 - Curva tensão deformação do concreto simples.....	23
Figura 2.4 - Diagrama esquemático do aparelho de ultrassom.....	28
Figura 2.5 - Aparelho de medição de ultrassom.....	29
Figura 2.6 - Transmissão direta.....	29
Figura 2.7 - Transmissão semi-direta.....	30
Figura 2.8 - Transmissão indireta.....	30
Figura 2.9 - Posição do transdutor-emissor para leituras indiretas.....	31
Figura 2.10 - Gráfico de medidas indiretas.....	31
Figura 2.11 - Influência do agregado graúdo na velocidade de propagação do pulso.....	33
Figura 2.12 - Efeito do comprimento do percurso.....	36
Figura 2.13 - Fatores de correção para barras transversais e longitudinais.....	37
Figura 2.14 - Esquema de medição da profundidade da fissura.....	38
Figura 2.15 - Esquema de correlação entre VPU x f_c	39
Figura 2.16 - Curva de correlação simples VPU x f_c	40
Figura 2.17 - Esquema do ensaio acústico.....	43
Figura 2.18 - Ensaio de excitação por impulso utilizando o Sonelastic®.....	44
Figura 2.19 - Modos de vibração de corpos de prova: 1) flexional, 2) torcional, 3) longitudinal e 4) planar.....	45
Figura 2.20 - Esquema de execução do ensaio de IE.....	49
Figura 2.21 - Variação entre curvas de correlação IE x f_c	50
Figura 2.22 - Marcas na superfície de corpos de prova cilíndricos.....	51
Figura 2.23 - Curva de resistência à compressão com diferentes agregados.....	52
Figura 2.24 - Curva de correlação simples IE x f_c	55
Figura 2.25 - Comparação de curvas Iso-Resistentes.....	57
Figura 2.26 - Curvas de Iso-Resistência.....	61
Figura 3.1 - Programa experimental resumido.....	63
Figura 3.2 - Porcentagem retida acumulada.....	65
Figura 3.3 - Porcentagem retida acumulada da brita.....	66
Figura 3.4 – a) Preparo dos materiais. b) Mistura do concreto. c) Ensaio de Slump Test.....	68

Figura 3.5 - Slump Test	69
Figura 3.6 - Corpos de prova com superfícies regularizadas	70
Figura 3.7 - Equipamento Ultrassom (Pundit) e realização do ensaio VPU	71
Figura 3.8 – Equipamento Sonelastic	72
Figura 3.9 – Ensaio RA a) Posicionamento do corpo de prova. b) Ponto de aplicação do impacto	72
Figura 3.10 - Posição dos pontos de ensaios nos CPs	73
Figura 3.11 - Realização do Ensaio IE	73
Figura 3.12 – Esclerômetro analógico de impacto Schmidt.....	74
Figura 3.13 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de Elasticidade estático	75
Figura 3.14 - Prensa Instron EMIC 23-600	76
Figura 3.15 - Ensaio de resistência à compressão axial	77
Figura 4.1- Evolução da resistência à compressão dos CPs ao longo da idade.....	79
Figura 4.2 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio de resistência à Compressão.....	79
Figura 4.3 - Evolução do módulo de Elasticidade dos CPs ao longo da idade	81
Figura 4.4 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio de módulo de Elasticidade.....	81
Figura 4.5 - Evolução da VPU nos CPs ao longo da idade	83
Figura 4.6 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio VPU	83
Figura 4.7 - Curva de correlação VPU x f_c	85
Figura 4.8 - Valores experimentais x valores analíticos para f_c a partir do ensaio VPU.....	86
Figura 4.9 - Comparação com curvas VPU x f_c obtidas por outros autores.....	86
Figura 4.10 – Comparativo dos valores experimentais com analíticos da resistência com outros autores.....	87
Figura 4.11-Curva de correlação VPU x E_c	89
Figura 4.12 - Valores experimentais x valores analíticos para E_c a partir do ensaio VPU	90
Figura 4.13 - Comparação com curvas VPU x E_c obtidas por outros autores.....	90
Figura 4.14 - Comparativo dos valores experimentais com analíticos do módulo com outros autores.....	91
Figura 4.15 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio RA.....	93
Figura 4.16 - Evolução dos módulos de Elasticidade dinâmico e estático dos CPs ao longo da idade	93

Figura 4.17 – Relação entre os módulos E_d / E_c ao longo das idades.....	94
Figura 4.18 – Relação entre a resistência à compressão e a relação (E_d/E_c) dos CPs	95
Figura 4.19 – Relação entre a resistência à compressão e o E_d	96
Figura 4.20 - Curva de correlação $E_d \times E_c$	97
Figura 4.21 - Comparativo dos valores experimentais com analíticos do módulo dinâmico...	98
Figura 4.22 - Comparação com curvas $E_d \times E_c$ obtidas por outros autores	98
Figura 4.23 - Comparação entre as equações analíticas $E_d \times E_c$ obtidas por outros autores ..	100
Figura 4.24 - Evolução dos IE ao longo da idade.....	102
Figura 4.25 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio IE.....	102
Figura 4.26 - Curva de correlação IE x f_c	104
Figura 4.27 - Valores experimentais x valores analíticos para resistência à compressão através do IE	105
Figura 4.28 - Comparação com curvas IE x f_c obtidas por outros autores.....	106
Figura 4.29 - Valores experimentais x analíticos para a resistência à compressão de acordo com diversos autores	107
Figura 4.30 - Análise do VPU e IE para o método combinado	109
Figura 4.31 - Gráfico de comportamento de f_c em função de VPU e IE.....	110
Figura 4.32 - Curvas de Iso-resistência	111
Figura 4.33 - Valores experimentais versus analíticos valores preditos para resistência à compressão através da correlação múltipla VPU x IE x f_c	112
Figura 4.34 - Valores experimentais versus analíticos para a resistência à compressão através da correlação múltipla VPU x IE x f_c e comparação com diversos autores	112
Figura 4.35 - Valores experimentais - analíticos para a resistência à compressão: correlação simples e múltipla.....	113
Figura 4.36 – Percentual de erro para f_c apresentados nas equações de correlação	114
Figura 4.37 – Comparação entre as equações analíticas para estimativa de f_c obtidas na pesquisa	115
Figura 4.38 - Curva de correlação (VPU x IE x f_c) proposta pela pesquisa – Modelo 1.....	116
Figura 4.39 - Curva de correlação (VPU x f_c x IE) proposta pela pesquisa – Modelo 2.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Intervalo de velocidade de propagação de onda para alguns agregados	34
Tabela 2.2 - Efeito da temperatura na velocidade de pulsos medidos.....	35
Tabela 2.3 - Proposta de equações de correlação	39
Tabela 2.4 - Equações propostas por outros autores para correlação VPU x f_c	41
Tabela 2.5 - Equações propostas por outros autores para correlação VPU x E	42
Tabela 2.6 - Proposta de equações de correlação	54
Tabela 2.7 - Equações propostas por outros autores para correlação IE x f_c	56
Tabela 2.8 - Proposta de equações de correlação múltipla.....	62
Tabela 2.9 - Equações propostas por outros autores para correlação VPU x IE x f_c	62
Tabela 3.1 - Relação dos ensaios para caracterização dos agregados	64
Tabela 3.2 - Composição granulométrica da areia	65
Tabela 3.3 - Composição granulométrica da brita.....	66
Tabela 3.4 Ensaios físicos e químicos do cimento CII - Z – 32 produzidos pela Itambé Cimentos (Valores Médios).....	67
Tabela 3.5 - Traços dos concretos	68
Tabela 3.6 – Ensaios realizados e quantidade de corpos de prova utilizados	70
Tabela 4.1 - Resistência à compressão axial dos CPs	78
Tabela 4.2 - Valores do ensaio de módulo de Elasticidade dos CPs.....	80
Tabela 4.3 - Valores do ensaio (VPU) dos CPs.....	82
Tabela 4.4 - Coeficiente de determinação para cada equação VPU x f_c	84
Tabela 4.5 - Intervalo de referência dos valores envolvidos	88
Tabela 4.6 - Coeficiente de determinação para cada equação VPU x E_c	88
Tabela 4.7 - Intervalo de referência dos valores envolvidos	92
Tabela 4.8 - Valores do ensaio de módulo de Elasticidade dinâmico dos CPs	92
Tabela 4.9 - Relação entre os módulos de Elasticidade dinâmico e estático (E_d/E_c)	95
Tabela 4.10 - Coeficiente de determinação para cada equação E_{cd} x E_c	96
Tabela 4.11 - Diferença entre os valores experimentais e analíticos do módulo de Elasticidade estático.....	99
Tabela 4.12 - Intervalo de referência dos valores envolvidos	100
Tabela 4.13 – Resultados do IE	101
Tabela 4.14 - Coeficiente de determinação para cada equação IE x f_c	103
Tabela 4.15 - Intervalo de referência dos valores envolvidos	107

Tabela 4.16 - Modelo de curvas e coeficientes de determinação da regressão múltipla VPU x IE x f_c	108
Tabela 4.17 - Nível de significância das variáveis	109

LISTA DE SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
CP	Corpo de prova cilíndrico
END	Ensaio não destrutivo
f_c	Resistência à compressão do concreto
E_c	Módulo de Elasticidade do concreto
E_d	Módulo de Elasticidade dinâmico do concreto
IE	Índice esclerométrico
VPU	Velocidade de propagação de onda ultrassônica
RA	Ensaio de ressonância acústica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivo específico	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	21
2.1.1	Resistência à compressão do concreto	22
2.1.2	Módulo de Elasticidade do concreto	23
2.1.3	Módulo de Elasticidade dinâmico do concreto	24
2.2	ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS	25
2.3	MÉTODO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA	27
2.3.1	Descrição do método	27
2.3.2	Vantagens, aplicações e limitações	32
2.3.3	Fatores que influenciam nos resultados	32
2.3.3.1	Tipo e relação de agregado graúdo	33
2.3.3.2	Tipo de cimento	34
2.3.3.3	Relação água / cimento	34
2.3.3.4	Umidade e cura do concreto	35
2.3.3.5	Temperatura do concreto	35
2.3.3.6	Comprimento de propagação da onda e frequência do transdutor-emissor	36
2.3.3.7	Presença de armaduras	36
2.3.3.8	Profundidade de fissuras	37
2.3.4	Recomendação quanto às curvas de correlação	38
2.4	MÉTODO DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA	43
2.4.1	Descrição do método	44
2.4.2	Vantagens, aplicações e limitações	46

2.4.3 Fatores que influenciam nos resultados	47
2.4.3.1 Influência da proporção das misturas e propriedades dos agregados.....	47
2.4.3.2 Tamanho da amostra	47
2.4.3.3 Influência das condições de cura.....	47
2.4.4 Correlação entre o módulo de Elasticidade E_a x E_c	48
2.5 MÉTODO DO ESCLEROMETRO DE REFLEXÃO	48
2.5.1 Descrição do método	48
2.5.2 Vantagens, aplicações e limitações	49
2.5.3 Fatores que influenciam nos resultados	50
2.5.3.1 Superfície do ensaio	50
2.5.3.2 Tamanho, forma e rigidez do elemento a ser ensaiado	51
2.5.3.3 Idade do concreto	51
2.5.3.4 Superfície e condições de umidade interna do concreto	51
2.5.3.5 Tipo de agregado graúdo	52
2.5.3.6 Tipo de cimento.....	53
2.5.3.7 Carbonatação da superfície de concreto	53
2.5.4 Recomendação quanto às curvas de correlação	54
2.5.5 Critérios de comparação de curvas de correlação	55
2.6 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS COMBINADOS	57
2.6.1 Método de combinação múltipla SonReb	58
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	64
3.1.1 Caracterização do agregado miúdo	65
3.1.2 Caracterização do agregado graúdo	66
3.1.3 Cimento Portland	67
3.2 COMPOSIÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO	68

3.3	ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA (VPU)	70
3.4	ENSAIO DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA (RA)	71
3.5	ENSAIO DE ESCLEROMETRIA (EI)	73
3.6	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL (E_{ci})	74
3.7	ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	76
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE	78
4.1.1	Resistência à compressão	78
4.1.2	Relação do módulo de Elasticidade tangente inicial entre os corpos de prova	80
4.2	VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA (VPU)	82
4.2.1	Relação da velocidade de propagação de onda entre os elementos analisados	82
4.2.2	Curvas de correlação simples	84
4.2.2.1	VPU x f_c	84
4.2.2.2	VPU x E_c	88
4.3	ENSAIO DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA	92
4.3.1	Relação do módulo de Elasticidade dinâmico obtido nos elementos analisados	92
4.3.2	Análise da correlação entre E_a e E_c	96
4.4	ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (IE)	101
4.4.1	Relação do índice esclerométrico entre os elementos analisados	101
4.4.2	Curvas de correlação simples	103
4.4.2.1	IE x f_c	103
4.5	MÉTODOS COMBINADOS	108
4.5.1	VPU x IE x f_c	108
4.5.1.1	Análise dos resultados das equações de correlação para estimativa de f_c	113
5	CONCLUSÃO	118
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
	APÊNDICE A	126

1 INTRODUÇÃO

Estruturas de concreto apresentam em parâmetros como a resistência do concreto à Compressão (f_c) e o módulo de Elasticidade (E_c) fundamental importância para o dimensionamento. Devido a esse fato, necessita-se assegurar que as resistências características e módulo de Elasticidade apresentados em projeto sejam atendidos ao longo da execução da estrutura (MACHADO 2009).

Para cada tipo e classe de concreto a ser colocado em uma nova estrutura devem ser realizados, segundo a ABNT NBR 12655 (2015), ensaios de controle consistência ABNT NBR NM 67 (1998) e resistência à compressão – ABNT NBR 5739 (2007), além de ensaios e determinações para o controle das propriedades correspondentes à durabilidade da estrutura, tais como o módulo de deformação estático mínimo na idade da desforma.

Há casos, no entanto, em que ocorre a necessidade do conhecimento das propriedades do concreto de estruturas já existentes. Nesse sentido, o ACI 440.2R (2017) comenta que antes mesmo do início do projeto de um reforço estrutural, a resistência do concreto da estrutura deve ser conhecida.

Para o ACI 228.2R (2013) os Ensaio Não Destrutivos (END) são métodos utilizados para determinar as propriedades e avaliar as condições do concreto das estruturas e são aplicados visando-se quatro razões principais: a) para o controle de qualidade de novas construções; b) para a solução de problemas em construções; c) avaliação das condições do concreto para finalidades de reabilitação e; d) para assegurar a qualidade do reparo executado.

Ainda segundo o ACI 228.2R (2013), cada vez mais, os END são aplicados para a investigação das estruturas de concreto, devido a vários fatores, entre eles: permitir a realização da avaliação *in situ* da estrutura, baixo custo na avaliação de grandes volumes de concreto quando comparados com outros métodos e resultados apresentados de forma imediata.

De acordo com ACI 228.2R (2013), Breyse (2012) e Pucinotti (2015), dentre os END, os principais métodos recomendados para a avaliação da resistência do concreto de estruturas existentes é o da Esclerometria (IE) ABNT NBR 7584 (2012) e ASTM C805/C805M (2013) e da Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas (VPU) ABNT NBR 8802 (2019) e ASTM C597 (2016). Para a avaliação do módulo de Elasticidade dinâmico do concreto é recomendado pelo ACI, como principal método, o da Ressonância Acústica RA ASTM C215 (2014).

Rashid e Waqas (2017) comentam que a estimativa da resistência à compressão do concreto não é confiável caso não seja estabelecida através de uma curva de correlação.

Pesquisadores, entre esses, Breyse (2012), Mohammed (2011) e Rashid e Waqas (2017) têm proposto a análise de regressão para estimar a resistência do concreto.

Segundo o ACI 228.1R (2003), os fabricantes de equipamentos fornecem relações generalizadas na forma de gráficos ou equações para relacionar a propriedade medida pelo aparelho de ensaio com a resistência do concreto. No entanto, essas relações, na maioria das vezes, não representam o concreto que está sendo analisado e, portanto, não devem ser utilizadas, ao menos que a validade delas tenham sido estabelecidas por meio de correlações sobre concreto similar àquele que está sendo investigado.

A pesquisa ora proposta busca estimar a resistência e o módulo de Elasticidade do concreto através dos parâmetros (IE, VPU e RA) obtidos em ensaios com corpos de prova cilíndricos 150 x 300 mm de concretos C20 a C50.

Os métodos de ensaio de esclerometria e velocidade de propagação de ondas serão também combinados com a finalidade de propor uma equação geral para estimativa da resistência e módulo de Elasticidade dos concretos analisados. Também será realizada a comparação dos resultados obtidos no presente estudo com os encontrados na literatura, em outras pesquisas. Curvas de Iso-resistência serão projetadas utilizando-se as recomendações da RILEM (1993).

A pesquisa está inserida num contexto de continuidade as iniciativas do trabalho de Vicentini (2017), buscando-se agora dosar os concretos em laboratório e realizar os ensaios visando-se elaborar curvas de correlação, simples e combinadas, para a estimativa da f_c e E_c de concretos C20 a C50.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral a obtenção de curvas de correlação simples e combinadas, entre a resistência e o módulo do concreto com os resultados provenientes dos ensaios não destrutivos de VPU, IE, RA em corpos de prova cilíndricos de concreto C20 a C50.

1.1.2 Objetivo específico

Como consequência do objetivo geral deste estudo, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver análise de regressão para o estabelecimento das relações $IE \times f_c$, $VPU \times f_c$, $IE \times E_c$, $VPU \times E_c$ e $E_d \times E_c$;
- Comparar os valores da resistência e do módulo estático obtidos experimentalmente com aqueles previstos analiticamente e verificar se ocorre uma super ou sub-estimativa, identificando-se esse valor;
- Desenvolver análise de regressão para o estabelecimento das relações $VPU \times IE \times f_c$ e $VPU \times IE \times E_c$, buscando-se uma equação geral para a estimativa da resistência e do módulo do concreto a partir dos valores de IE-VPU e IE-VPU-RA, respectivamente;
- Comparar as equações com aquelas obtidas em outros trabalhos;
- Projetar curvas de Iso-resistência.
- Estabelecer curvas de correlação através de combinações múltiplas entre o ensaio de velocidade de propagação de onda, ensaio de ressonância acústica e índice esclerométrico com a resistência à compressão e módulo de Elasticidade em CPs;

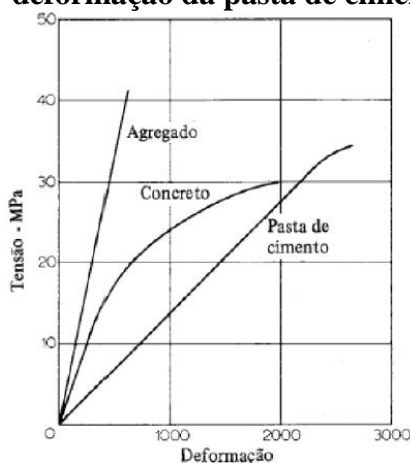
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

O concreto trata-se de um compósito formado por pasta de cimento hidratada e agregado miúdo e graúdo, Mehta e Monteiro (2014) e Neville (1997) afirmam que estes diferentes compósitos apresentam propriedades de materiais complexas e a soma das propriedades de seus componentes não é igual.

Tal afirmação pode ser observada de acordo com ensaios nos componentes do concreto (agregado e pasta de cimento) submetidos de maneira separada à carregamentos de modo a obter as curvas tensão-deformação, a partir desta análise é possível observar que o concreto não apresenta comportamento elástico linear (NEVILLE, 1997). A Figura 2.1 apresenta as curvas tensão deformação da pasta de cimento, agregado e do concreto.

Figura 2.1 - Curvas tensão-deformação da pasta de cimento, agregado e do concreto



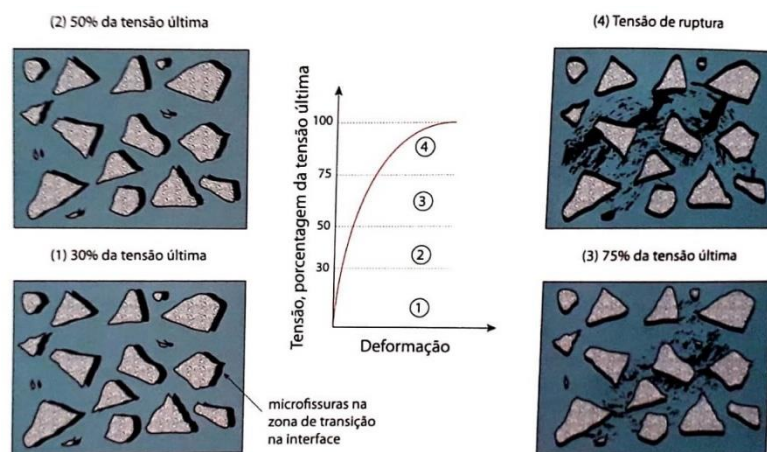
Fonte: Neville (1997)

Mehta e Monteiro (2014) e Neville (1997) explicam que a não-linearidade da relação tensão-deformação do concreto é devido a microfissuração progressiva do concreto sob efeito de cargas, sendo que o surgimento de fissuras faz com que ocorra a redução da área efetiva que resiste à carga aplicada.

A Figura 2.2 apresenta o comportamento da curva tensão-deformação do concreto e o surgimento de microfissuras, de acordo com a Figura é possível analisar que abaixo de 30% da carga última as fissuras na zona de transição entre a matriz e o agregado graúdo permanecem estáveis na interface e a curva tensão-deformação permanece linear. Até um valor de 50% da tensão última, o sistema de microfissuras permanece estável, acima de 60% da carga última ocorre o surgimento de novas fissuras na matriz e após 75% da carga última, o surgimento de

novas fissuras na zona de transição na interface se torna instável, bem como, ocorre a proliferação da propagação de fissuras na matriz, fazendo com que a curva tensão-deformação incline de maneira considerável para horizontal. Entre 75% e 80% da carga última ocorre o nível crítico de crescimento das fissuras sob tensão constante e o material se deforma até romper.

Figura 2.2 - Comportamento da curva tensão-deformação do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

2.1.1 Resistência à compressão do concreto

A Resistência à compressão do concreto é considerada uma das propriedades mais importantes quando relacionada ao concreto, embora, em alguns casos práticos características como durabilidade e permeabilidade são consideradas mais importantes (NEVILLE, 1997).

Tal resistência é utilizada em muitos casos para a determinação de propriedades mecânicas como por exemplo módulo de Elasticidade estático e fluência.

O acompanhamento da evolução do ganho de resistência do concreto é de grande importância para estruturas projetadas em concreto, sendo a verificação da resistência realizada através de ensaios à compressão, geralmente aos 28 dias em CPs cilíndricos ou cúbicos (MACHADO, 2009).

Mehta e Monteiro (2014) apresentam alguns fatores que podem influenciar na resistência à compressão do concreto, dentre eles, relação água/cimento, dimensão do agregado, velocidade de aplicação da carga e grau de hidratação.

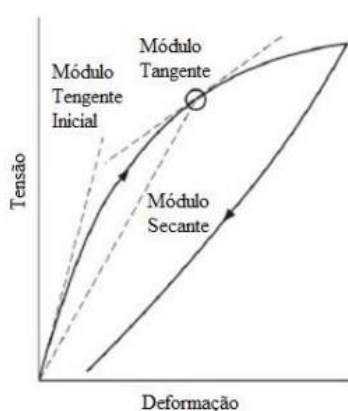
As premissas adotadas para a realização do ensaio de resistência à compressão de concreto em corpos de prova cilíndricos ou prismáticos segue as premissas das referidas normas, ABNT NBR 12655 (2015) recebimento e aceitação do concreto em estado fresco,

ABNT NBR 5738 (2015) moldagem e cura dos CPs e ABNT NBR 5739 (2007) para ensaio de compressão de CPs.

2.1.2 Módulo de Elasticidade do concreto

O módulo de Elasticidade é um parâmetro importante para avaliação de estruturas projetadas em concreto. O mesmo é determinado através da declividade da curva tensão-deformação, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Curva tensão deformação do concreto simples



Fonte: Neville (1997)

De acordo com a Figura 2.3, é possível identificar três módulos, dentre eles, módulo de Elasticidade tangente inicial, módulo tangente e módulo secante.

O traçado do módulo de Elasticidade tangente é elaborado através de uma linha tangente a curva de tensão deformação em qualquer ponto da curva, porém, quando traçado na tangente a origem, é denominado módulo de Elasticidade tangente inicial (E_{ci}).

Já o módulo secante (E_{cs}) é obtido através da declividade de uma linha traçada da origem até um ponto da curva que corresponde a tensão de 40% da carga de ruptura.

Em situações em que não são fornecidos resultados obtidos por meio de ensaios experimentais, o cálculo do módulo de Elasticidade pode ser estimado através de equações propostas por normas, no Brasil a ABNT NBR 6118 (2014) fornece equações para estimativa do módulo de Elasticidade.

Para casos em que o módulo de Elasticidade será obtido através de ensaios experimentais, a metodologia é realizada de acordo com a ABNT NBR 8522 (2017), onde a referida norma apresenta os ensaios de módulo de Elasticidade secante (E_{cs}) e modulo de Elasticidade tangente inicial (E_{ci}).

Machado (2009) cita casos onde há necessidade da determinação do módulo de Elasticidade *in situ*, para estes casos, é possível estimar através de correlações com ensaios END, dentre eles uma opção é o ensaio de VPU normatizado pela ABNT NBR 8802 (2019).

2.1.3 Módulo de Elasticidade dinâmico do concreto

O módulo de Elasticidade dinâmico é determinado por meio de vibrações aplicados a corpos de prova de concreto. De acordo com Neville (1997) a heterogeneidade do concreto influencia o módulo de Elasticidade dinâmico e estático, o que implica em uma relação não tão simples entre os dois módulos quando se toma por base o comportamento físico.

Dentre as técnicas experimentais para a determinação do módulo de Elasticidade dinâmico citam-se o método de ressonância acústica (RA), e a velocidade de propagação de onda (VPU).

O ensaio RA consiste em induzir a resposta acústica do corpo de prova por meio de uma pancada aplicada no sentido de vibração de interesse induzindo a resposta acústica. Tal resposta é composta por frequências naturais de vibração que permitem a determinação do módulo dinâmico. Já o ensaio VPU realiza a leitura do tempo que a onda ultrassônica leva para percorrer o corpo de prova. Ambas as técnicas apresentam resultados de módulo dinâmico semelhantes, sendo o ensaio VPU mais utilizado quando comparado ao ensaio RA.

Para Mehta e Monteiro (2014), o módulo dinâmico apresenta uma deformação instantânea muito pequena, onde em geral, é aproximadamente o mesmo valor do módulo de Elasticidade tangente inicial. Em geral é 20, 30 e 40 % mais alto do que o módulo estático para concretos de alta, média e baixa resistência. Sendo que o módulo dinâmico é mais utilizado para analisar tensões em estruturas que são submetidas a terremotos ou cargas de impacto.

Segundo Malhotra e Sivasundaram (2004), a resistência à compressão interfere no diretamente nos valores de módulo de Elasticidade, sendo que o aumento do módulo de Elasticidade dinâmico aumenta de acordo com o aumento da resistência à Compressão.

Diógenes et al. (2011) cita que não existe uma equação única que permite relacionar o módulo dinâmico (E_d) com módulo estático (E_c). Algumas equações empíricas que relacionam os módulos estáticos (E_c) e dinâmico (E_d).

Uma expressão é apresentada no código britânico BS 8110 - 2 (1985), conforme equação 2.1.

$$E_c = 1,25 E_d - 19 \quad (2.1)$$

Para concretos com mais de 500 kg/m³ bem como para concretos com agregados leves a BS 8110 - 2 (1985) propõe a equação 2.2 a seguir.

$$E_c = 1,04 E_d - 4,1 \quad (2.2)$$

Lyndon e Baladran (1986) propõe a equação 2.3.

$$E_c = 0,83 E_d \quad (2.3)$$

2.2 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

Ensaio não destrutivo são ensaios que apresentam como característica ausência de danos ao elemento a ser ensaiado ou quando deixam, os danos são pequenos e podem ser reparados após realização do ensaio. Essa característica faz com que não ocorram perdas de capacidade de resistência do elemento ensaiado.

ENDs podem ser aplicados tanto em estruturas novas ou antigas, no caso de estruturas novas utiliza-se o monitoramento da evolução da resistência ou esclarecimento e dúvidas sobre a qualidade do concreto (EVANGELISTA, 2002).

Para Pucinotti (2015), o uso de métodos ENDs é geralmente justificável se uma correlação direta é realizada entre os resultados dos ensaios ENDs e a resistência à compressão de CPs extraídos da estrutura.

De acordo Breyse (2012) e Pucinotti (2015), os ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica (VPU) e índice esclerométrico (IE) são os principais métodos para a estimativa da resistência à Compressão.

Devido aos parâmetros que influenciam nos resultados dos ENDs, adotam-se diretrizes específicas para a realização dos ensaios, dentre elas, as normas ASTM C597 (2016) e ABNT NBR 8802 (2019) para ensaio VPU e ASTM C805/C805M (2013) e ABNT NBR 7584 (2013) para o ensaio IE.

A norma britânica BS 1881: Parte 201 (1986) apresenta as finalidades de ensaios não destrutivos:

- Controle tecnológico em estruturas pré-moldadas ou construção “in loco”;
- Aceitação de materiais fornecidos;

- Esclarecimento de dúvidas a respeito da mão de obra envolvida em mistura, lançamento, compactação ou cura do concreto, transporte;
- Monitoramento do desenvolvimento da resistência visando remoção de formas, duração da cura, aplicação de protensão ou de cargas, remoção de escoramento;
- Localização e determinação da extensão de fissuras, vazios e falhas de concretagem;
- Determinação da posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- Determinação da uniformidade do concreto;
- Aumento do nível de confiança de um pequeno número de ensaios destrutivos;
- Verificação da deterioração do concreto resultante de sobrecarga, fadiga, fogo, ataque do meio ambiente;
- Avaliação do potencial de durabilidade do concreto;
- Monitoramento de mudanças das propriedades do concreto ao longo do tempo;
- Fornecimento de informações para que se verifique se é possível mudar a utilização de uma estrutura.

De acordo com Adamati (2017), pesquisadores afirmam que ENDs têm sido empregados para localização e avaliação de falhas e defeitos em estruturas de concreto, bem como em diagnósticos mais complexos.

O ACI 228.1R (2013) cita que a utilização de ENDs em campo deve ser acompanhada por curvas de correlação, obtidas a partir de ensaios realizados em laboratório por meio de CPs, cilíndricos ou cúbicos, feitos com o mesmo material utilizado na estrutura a ser avaliada. Nestes CPs são realizadas medições por meio de ENDs, em seguida submetidos a ensaios destrutivos. Por fim os pares de resultados são utilizados para obtenção das expressões que caracterizem a análise de correlação.

Uma metodologia adotada para a elaboração de curvas de correlação de ENDs com ensaios destrutivos se faz por meio de combinação simples ou múltipla, utilizando dois ou mais ENDs.

Lim e Cao (2013) indicam a combinação múltipla entre diferentes métodos de ENDs para um maior o nível de confiabilidade dos resultados.

A combinação de ENDs é chamada de SonReb, tal metodologia é com base na Rilem (1993), a mesma realiza a combinação dos ensaios ENDs propondo a construção de curvas de Iso-resistência.

Com base na literatura a que se refere ao tema, serão apresentadas as metodologias dos ensaios a respeito da velocidade de propagação de onda ultrassônica, método de ressonância acústica, ensaio de índice esclerométrico e curvas de Iso-resistencia.

2.3 MÉTODO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA ULTRASSÔNICA

O método da velocidade de propagação de onda ultrassônica VPU, consiste na medição do tempo que uma onda leva para percorrer uma certa distância delimitada por dois eletrodos distantes entre si.

Os primeiros relatos de medição da velocidade pulsos ultrassônicos em estruturas de concreto surgiram nos EUA em meados da década de 1940. Uma das principais constatações foi que a velocidade de propagação de onda dependia principalmente das propriedades elásticas do material e pouco da geometria (BUNGEY et al., 2006).

O método VPU foi desenvolvido tendo como principal objetivo a estimativa da resistência à compressão do concreto por meio de curvas de correlação, sendo amplamente utilizado devido sua facilidade de execução, rapidez e boa capacidade na detecção de falhas (ADAMATTI et al., 2017).

Ainda de acordo com Adamatti et al. (2017), diversas pesquisas relacionadas ao concreto e VPU permitem a avaliação, por exemplo, da degradação das propriedades mecânicas do concreto e da argamassa, influência da presença de armaduras para estimativa da profundidade de fissuras superficiais, monitoramento de estruturas de concreto armado, avaliação da resistência à compressão do concreto.

Rashid e Waqas (2017) relatam que não existe padrão para a correlação da velocidade de propagação de onda com a resistência à compressão do concreto, isso ocorre devido a vários fatores que interferem na resistência à compressão do concreto, dentre eles, a característica do agregado utilizado na elaboração do traço de concreto, uma vez que este influencia diretamente em suas propriedades mecânicas.

A metodologia adotada para a realização do ensaio VPU será de acordo com as normas ABNT NBR 8802 (2019) e ASTM C597 (2016).

2.3.1 Descrição do método

O método consiste em calcular a velocidade de ondas ultrassônicas VPU transitando em um material sólido. A medição do ensaio é feita de maneira eletrônica, medindo o tempo de

propagação de ondas ultrassônicas através do concreto, passando pelo emissor e receptor (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

A velocidade da onda depende da densidade e das propriedades elásticas do material, a equação 2.4 a seguir apresenta o cálculo da velocidade de propagação.

$$V = \sqrt{\frac{(1 - \nu)E_d}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho}} \quad (2.4)$$

Onde:

V é a velocidade de onda, km/s;

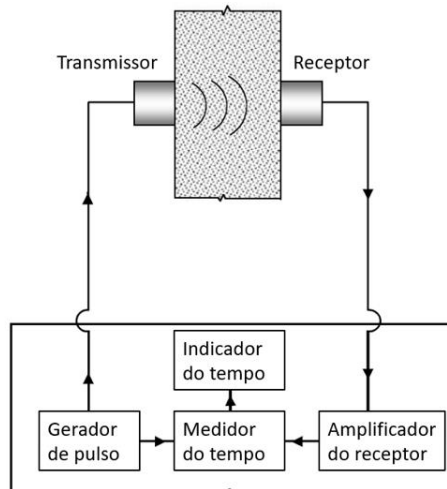
E_d é o módulo de Elasticidade dinâmico, kN/mm²;

ρ é a massa específica, kg/m³;

ν é o coeficiente de Poisson dinâmico.

As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam o diagrama esquemático do ensaio VPU e o aparelho de medição.

Figura 2.4 - Diagrama esquemático do aparelho de ultrassom



Fonte: Adaptado Naik, Malhotra e Popovics (2004)

Figura 2.5 - Aparelho de medição de ultrassom



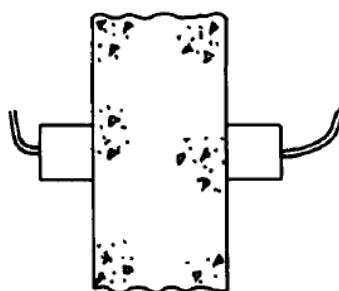
Fonte: Naik, Malhotra e Popovics (2004)

De acordo com Bungey et al., (2006), a velocidade da onda depende dos seguintes fatores: coeficiente de Poisson, módulo de Elasticidade, massa específica do concreto e a presença de armadura.

O ensaio pode ser feito de três maneiras diferentes, sendo elas, transmissão direta, indireta e semi-direta.

A transmissão direta, conforme a Figura 2.6, é o método mais confiável do ponto de vista de medição do tempo. Uma vez que o caminho é claramente definido e pode ser medido com precisão e esta abordagem deve ser utilizada sempre que possível para avaliar a qualidade do concreto (BUNGEY et al., 2006).

Figura 2.6 - Transmissão direta

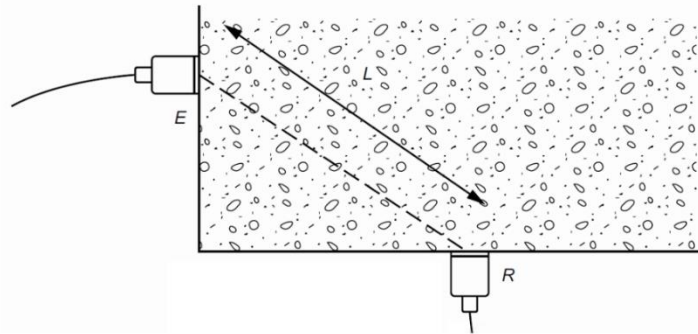


Fonte: Bungey (2006)

O método semi-direto pode ser usado de maneira satisfatória, isso se o ângulo entre os transmissores e o comprimento do caminho não for muito grande. Caso estes requisitos não sejam cumpridos é possível que o sinal não seja claro (BUNGEY et al, 2006). A Figura 2.7 a seguir apresenta o método de medição semi-direto.

A ASTM C597 (2016) também cita que no método de medição semi-direto, a leitura do tempo que a onda demora para percorrer as regiões nos cantos pode apresentar perdas e sensibilidade na precisão.

Figura 2.7 - Transmissão semi-direta



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019)

Outro método de medição é chamado de método indireto, tal método é realizado de acordo com a Figura 2.8. Ainda segundo Bungey et al., (2006), o método de transmissão indireta é o menos indicado, isso devido a amplitude do sinal.

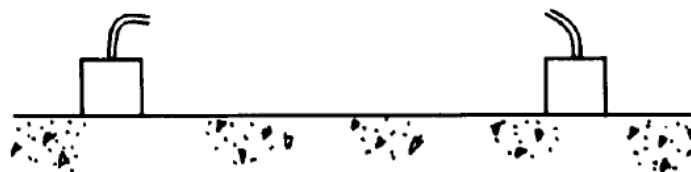
O sinal recebido depende da dispersão do pulso por descontinuidade, o que faz com que ele fique sujeito a erros.

Para a leitura da transmissão indireta é necessário um procedimento especial para dar conta da falta de precisão. Dessa maneira é feita uma série de leituras com o transmissor fixo e o receptor distribuído em uma série de pontos.

A ASTM C597 (2016) não indica a medição por transmissão indireta, pois, as leituras da velocidade da onda obtidas podem estar relacionadas apenas as camadas superficiais do concreto, não estando de acordo com as leituras obtidas internas ao concreto.

Breysse (2012) relata que medições indiretas são mais sensíveis próximas a superfície e pode ser afetada pela carbonatação.

Figura 2.8 - Transmissão indireta

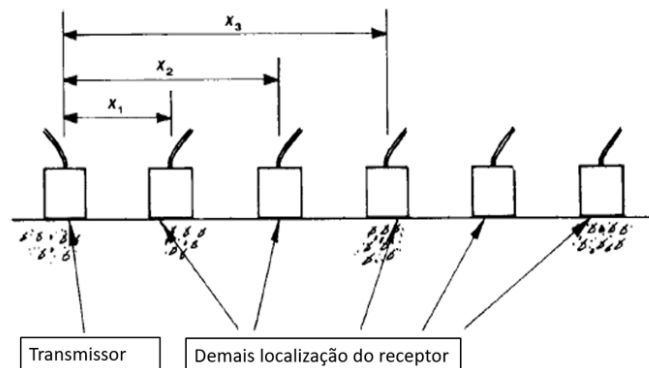


Fonte: Bungey (2006)

Para o caso de transmissão indireta a ABNT NBR 8802 (2019) apresenta o procedimento para se determinar a velocidade de propagação.

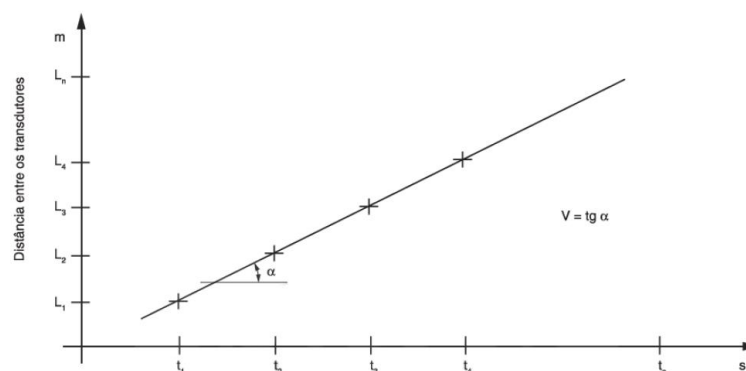
- Fixar o transdutor-emissor em um ponto (E);
- Fazer a leitura do tempo de propagação de ondas, estando o transdutor-receptor nos pontos $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, equidistantes entre si e sobre uma mesma reta que contém o ponto fixo do transdutor-emissor conforme apresentado na Figura 2.8.
- Local, em um sistema cartesiano de eixos, as distâncias entre os pontos (E) e R_1 e R_n , e os tempos lidos para que a onda ultrassônica percorra estas distâncias, a Figura 2.9 apresenta a posição do transdutor – emissor para a realização de leituras indiretas e a 2.10 apresenta o gráfico utilizados para medidas indiretas.

Figura 2.9 - Posição do transdutor-emissor para leituras indiretas



Fonte: Bungey (2006)

Figura 2.10 - Gráfico de medidas indiretas



Fonte: ABNT NBR 8802 (2019)

Em laboratório o ensaio VPU é conduzido de maneira direta, onde a transmissão é definida em linha reta entre as superfícies opostas do CPs do ensaio. Porém, quando o ensaio é realizado em campo a transmissão direta pode não ser uma opção viável, como por exemplo

em pontes, nesse caso o ensaio é conduzido de maneira indireta ou semi-direta (YAMAN, 2001).

2.3.2 Vantagens, aplicações e limitações

De acordo com a ASTM C597 (2016), o método VPU é aplicável para avaliar a uniformidade relativa ao concreto, indicar presença de vazios e surgimento de fissuras. Podendo também ser utilizado para o monitoramento de estruturas ao longo do tempo, neste caso a região onde os ensaios são realizados devem ser marcadas de modo a permitir que os ensaios posteriores sejam realizados no mesmo local.

Para a BS 1881: Part 201 (1986), os valores de medição das ondas para a grande maioria das misturas de concreto utilizados se situam em faixas restritas, tornando necessário uma medição rigorosa, com uma acurácia de aproximadamente 1%, tanto para o comprimento do percurso quanto para o tempo gasto pela onda.

Segundo a ASTM C597 (2016), a precisão da medição depende da capacidade do operador de determinar a precisão e a interpretação dos resultados. Uma vez que a intensidade do sinal recebido é afetada pelo correto acoplamento dos transdutores na superfície de concreto.

Ainda de acordo com a ASTM C597 (2016), testes envolvendo cinco diferentes operadores ou equipamentos realizados em concretos apresentando boas condições, resultaram em um valor de aproximadamente 2% no valor do resultado final.

Para Naik, Malhotra e Popovics (2004), caso a superfície não esteja bem acoplada na realização do ensaio, ocorre a formação de bolsões de ar entre o transdutor e o elemento, isso faz com que ocorra um erro na leitura do tempo de percurso da onda. Este erro ocorre pelo fato de que uma quantidade insignificante do pulso pode ser transmitida pelo ar. Para a obtenção do perfeito contato é indicado a utilização de produtos, tais como, graxa e sabão líquido aplicados em finas camadas.

2.3.3 Fatores que influenciam nos resultados

Embora seja relativamente fácil realizar o ensaio, é necessário que os resultados sejam fornecidos apenas pelas propriedades do concreto e não por outros fatores.

De acordo com as normas ABNT NBR 8802 (2019), ASTM C597 (2016), bem como pesquisadores, dentre eles, Bungey et al., (2006), Naik, Malhotra e Popovics (2004) e Breysse (2012) existem diversos fatores que podem influenciar na estimativa dos resultados.

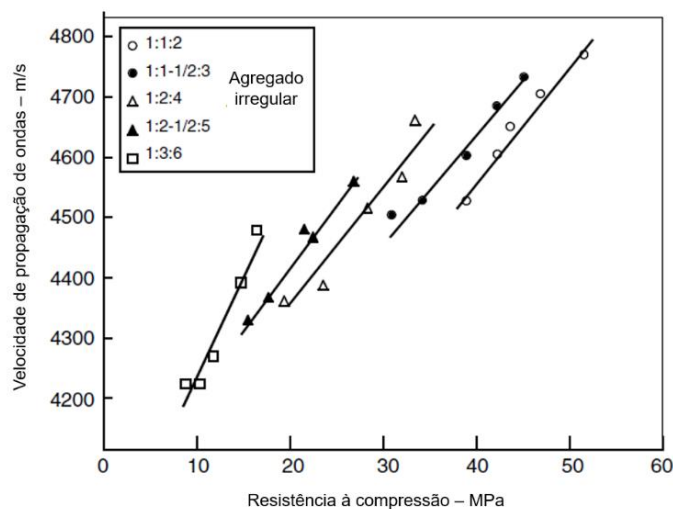
Para Naik, Malhotra e Popovics (2004), os fatores que afetam a velocidade do pulso podem ser divididos em duas categorias. As que relacionam os fatores que afetam tanto a propriedade do concreto quanto medição do ensaio VPU, tais como, a relação do agregado graúdo (tipo, tamanho e graduação), tipo de cimento, relação água / cimento, uso de aditivos, grau de compactação, condição de cura e idade do concreto. E aquelas que afetam apenas medição do ensaio VPU, dentre eles, contato entre os transdutores e o concreto, temperatura do concreto, condições de umidade do concreto, comprimento de propagação da onda, tamanho e forma das amostras, nível de tensão e presença de armaduras.

Breysse (2012) também cita fatores que influenciam na resistência do concreto obtidas através do ensaio VPU, tais como, a porcentagem, diâmetro máximo e densidade de agregado graúdo, a relação água/cimento e presença de fissuras.

2.3.3.1 Tipo e relação de agregado graúdo

De acordo Naik, Malhotra e Popovics (2004), muitas pesquisas apresentam que a velocidade de propagação do pulso é afetada de maneira significativa pelo tipo e quantidade do agregado graúdo. A Figura 2.11, apresenta os efeitos da proporção de agregados graúdos em uma mistura de concreto, comparando a relação VPU e a resistência à compressão. Para um dado valor de VPU, quanto maior for a relação de agregado graúdo / cimento, menor é a resistência do concreto.

Figura 2.11 - Influência do agregado graúdo na velocidade de propagação do pulso



Fonte: Adaptado Naik; Malhotra; Popovics (2004)

Para Chung e Law (1983), os agregados graúdos e miúdos tem diferentes módulos de Elasticidade e apresentam velocidade de onda maiores do que a pasta de cimento. Dessa

maneira os concretos com massa específica maior ou com maiores quantidades de agregados tendem a apresentar maior velocidade de propagação de onda. A Tabela 2.1 apresenta os intervalos de velocidade de propagação de onda para alguns tipos de rochas utilizadas como agregados.

Tabela 2.1 - Intervalo de velocidade de propagação de onda para alguns agregados

Tipo de Rocha	V (km/s)
Basalto	5,27 – 6,02
Dolomita	4,37 – 6,09
Granito	4,00 – 5,79
Calcário	3,91 – 5,78
Arenito	2,55 – 4,23
Quartzito	5,57 – 5,72

Fonte: Chung e Law (1983)

2.3.3.2 Tipo de cimento

Estudos indicam que o tipo de cimento não apresenta um efeito significativo na velocidade da onda ultrassônica. Porém a taxa de hidratação é diferente para diferentes tipos de cimentos e influenciaria na velocidade do pulso. Conforme o grau de hidratação aumenta tanto o módulo de Elasticidade quanto a velocidade do pulso ultrassônico (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

De acordo com Evangelista (2002), ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica elaborados por Sturup et al., (1984) em concretos com cimento Portland comum e de alta resistência inicial, empregando a mesma quantidade de cimento e relação de água / cimento variáveis, ensaiados na idade de 12 horas a 91 dias não apresentaram diferença significativa nos resultados.

Evangelista (2002) também não encontrou influência significativa do tipo de cimento no valor da velocidade de propagação de onda ultrassônica, ao efetuar uma análise estatística dos valores de VPU em concretos ensaiados nas idades de 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Os concretos utilizados nos ensaios foram elaborados utilizando cimento CP III e CP V, foi mantido constante o tipo e a dimensão do agregado graúdo (gnaisse com $D_{máx} = 19$ mm), variando a relação água / cimento de 0,40 a 0,65.

2.3.3.3 Relação água / cimento

A velocidade de propagação de onda em um material elástico está relacionada com parâmetros como o módulo de Elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade. Onde estas

grandezas não estão relacionadas com a resistência do material. Dessa maneira a relação a/c influencia diretamente na resistência à compressão do material e pouco na velocidade de propagação de onda (NOGUEIRA e WILLAN, 2001).

2.3.3.4 Umidade e cura do concreto

De acordo com a norma britânica BS 1881: Parte 203 (1986), o teor de umidade tem efeito na velocidade de onda, isso por ter efeito físico e químico sobre a mesma. Estes efeitos são importantes para a elaboração de curvas de correlação para a estimativa da resistência à Compressão. Para corpos de prova com o mesmo traço de concreto com amostras curadas em laboratório e outras em campo, pode ocorrer uma diferença significativa na velocidade de onda, isto é, devido a diferença nas condições de cura na hidratação do cimento, bem como, a presença de vazios. Estes efeitos devem ser considerados para se estimar as resistências do concreto.

De acordo com Breysse (2012), a velocidade do pulso pode aumentar em até 5% em CPs ensaiados em condição seca ou saturada, onde, em muitas vezes desconsiderar o efeito da umidade no ensaio VPU pode induzir a erros no resultado do ensaio, bem como, na correlação com a resistência do concreto.

A ABNT NBR NM 58 (1996) cita que variações de umidade inferiores a 1% não modificam o valor da velocidade.

2.3.3.5 Temperatura do concreto

De acordo com a norma britânica BS 1881: Parte 203 (1986), temperaturas entre 10°C e 30°C não causam alterações significativas nos resultados do ensaio de velocidade de propagação de onda. Para temperaturas fora desse intervalo, deve se fazer uso de correções. A Tabela 2.2 apresenta as correções propostas pela norma britânica.

Tabela 2.2 - Efeito da temperatura na velocidade de pulsos medidos

Temperatura °C	Correção da velocidade de pulso medidos	
	Concreto seco ao ar %	Concreto saturado com água %
60	5	4
40	2	1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

Fonte: Adaptado BS 1881: Parte 203 (1986)

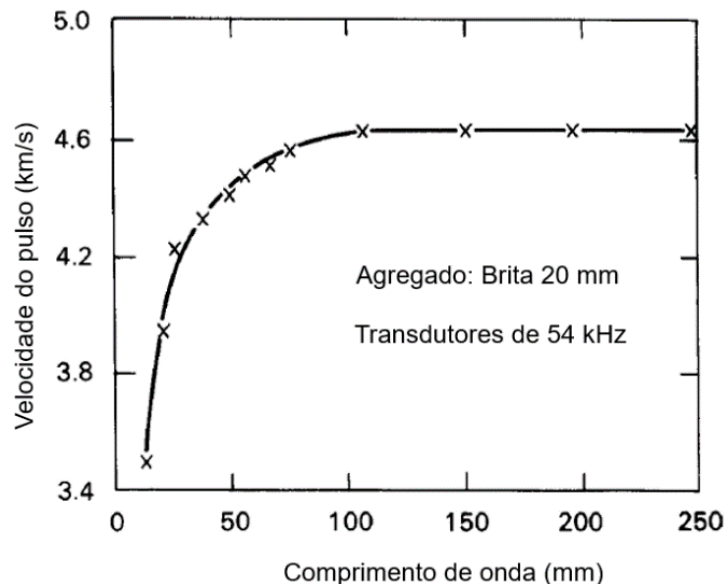
2.3.3.6 Comprimento de propagação da onda e frequência do transdutor-emissor

De acordo com a BS 1881: Parte 203 (1986), o comprimento de propagação da onda dever ser suficiente para não influenciar nos resultados devido à natureza heterogênea do concreto. Recomenda-se um comprimento de 100 mm para concretos com dimensão máxima nominal do agregado de 20 mm ou menos e 150 mm para a dimensão máxima nominal do agregado entre 20 e 40 mm. Em geral a velocidade do pulso não é influenciada por mudanças no comprimento do caminho da onda, embora o aparelho de temporização eletrônico possa indicar uma redução da velocidade quando é aumentado o comprimento do percurso. Este fato pode ocorrer, pois, a redução da velocidade do pulso decorre da dificuldade em definir o aparecimento das ondas. Em geral esta redução é pequena e dentro das margens de tolerância.

A ABNT NBR NM 58 (1996) indica a distância a ser percorrida pela onda ultrassônica. Utilizando-se transdutores com frequência de 54 kHz e distância mínima de 150 mm para transmissão direta e 400 mm quando realizada transmissão indireta.

A Figura 2.12 apresenta de acordo com Bungey, Millard e Grantham (2006), o efeito que pequenos percursos podem afetar a velocidade do pulso ultrassônico.

Figura 2.12 - Efeito do comprimento do percurso



Fonte: Adaptado Bungey, Millard e Grantham (2006)

2.3.3.7 Presença de armaduras

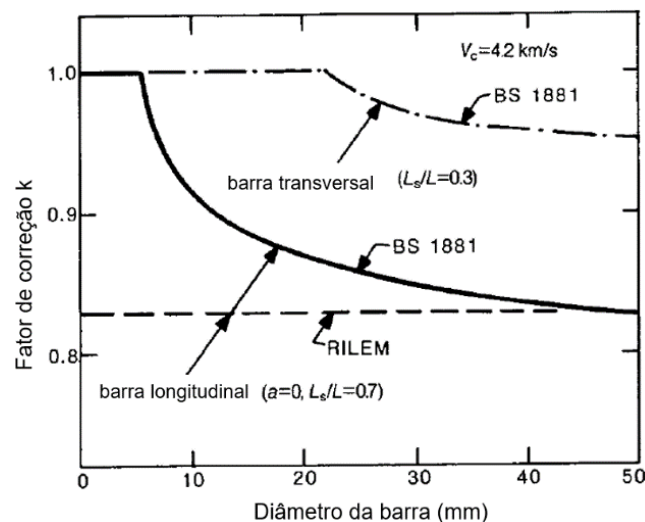
A presença de armadura é um dos fatores mais significativos na velocidade da onda. A velocidade do pulso no aço é de 1,4 a 1,7 vezes a velocidade do pulso em concreto simples.

Dessa maneira a leitura da velocidade de onda em regiões próximas a armadura é mais alta do que em regiões com concreto liso. Sempre que possível as leituras devem ser realizadas fora da região de concentração de armadura (NAIK; MALHOTRA; POPOVICS, 2004).

A norma britânica BS 1881: Parte 203 (1986) cita que a frequência do pulso e as condições da superfície da barra podem afetar na velocidade de propagação da onda. Desse modo a referida norma indica a utilização de correção para a leitura da velocidade da onda em regiões próximas a armaduras.

A Figura 2.13 elaborada por Bungey, Millard e Grantham (2006) apresenta os fatores de correção para armaduras longitudinais e armaduras transversais do elemento de acordo com as normas BS 1881: Parte 203 (1986) e Rilem (1972) sendo, L_s o comprimento da armadura longitudinal da barra e L o comprimento da seção transversal do aço.

Figura 2.13 - Fatores de correção para barras transversais e longitudinais

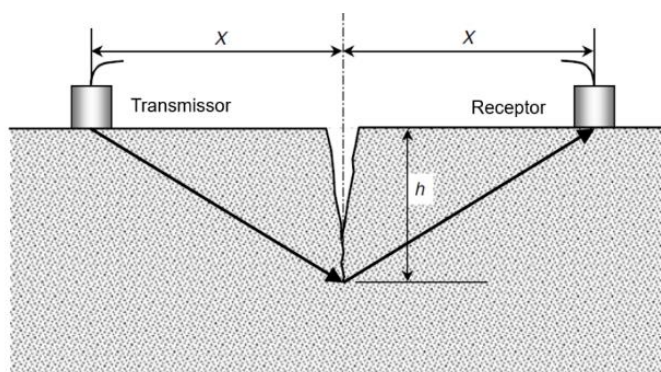


Fonte: Adaptado Bungey, Millard e Grantham (2006)

2.3.3.8 Profundidade de fissuras

Segundo Bungey, Millard e Grantham (2006), no caso de fissuras, ou mesmo microfissuras no concreto, a mesma será suficiente para interromper o caminho percorrido pela onda, estas contornam a fissura, apresentando um maior tempo de trânsito. Caso a velocidade seja conhecida é possível detectar o início da formação de fissuras bem como o monitoramento devido ao aumento da carga. A Figura 2.14 a seguir apresenta o esquema de medição da profundidade da fissura através do pulso ultrassônico.

Figura 2.14 - Esquema de medição da profundidade da fissura



Fonte: Adaptado Naik, Malhotra e Popovics (2004)

Naik, Malhotra e Popovics (2004) citam casos em que nas fissuras preenchidas com água, a velocidade do pulso não altera a velocidade da onda, pois, a onda ultrassônica se propagará por meio destas, isso implica em resultados falhos nas leituras da velocidade da onda.

2.3.4 Recomendação quanto às curvas de correlação

As curvas de correlação devem ser estabelecidas experimentalmente utilizando um número suficiente de amostras de modo a fornecer confiabilidade estatística. Usualmente a correlação é feita com CPs moldados com concreto no local e curado em laboratório, porém estudos apontam que CPs curados em laboratório apresentam resultados diferentes do que corpos de prova extraídos da própria estrutura (BS 1881: Parte 203, 1986).

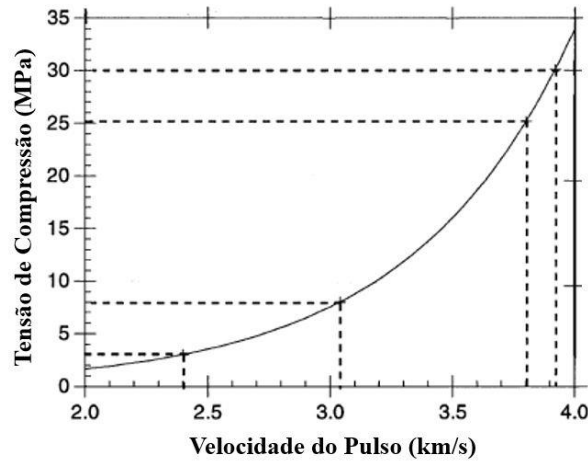
Ainda de acordo com a referida norma, deve ser realizado pelo menos três medições de velocidade de pulso em cada CP, sendo a variação entre os tempos de trânsito das três medições de velocidade de onda por volta de $\pm 5\%$. Em seguida é construída a curva com os resultados obtidos pelas médias dos ensaios VPU e os valores de resistência à compressão obtidos nos ensaios dos CPs.

A correlação entre resistência à compressão do concreto e velocidade de ondas deve ser realizada obtendo-se primeiramente a velocidade de onda em cada CP cilíndrico, de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, moldado e curado segundo procedimento padrão, estabelecido pela norma ABNT NBR 5738 (2015), e em seguida submetido-os aos ensaios destrutivos, dentre eles citam-se o ensaio de resistência à compressão e módulo de Elasticidade estático.

O ACI 228.1R (2016) indica a utilização de seis a nove resistências de concreto diferentes para a elaboração de curvas de correlação, ela também cita que utilizar menos de seis tipos de resistência pode resultar em altos valores de incertezas na estimativa da resistência do concreto.

A referida norma fornece um esquema para a construção de curvas de correlação VPU x f_c , conforme apresentado na Figura 2.15.

Figura 2.15 - Esquema de correlação entre VPU x f_c



Fonte: Adaptado ACI 228.1R (2016)

A prática usual dos tratamentos dos valores obtidos nos ensaios é por meio de pares de dados, plotando o teste *in loco* como valor independente (variável X) e a resistência à compressão como valor dependente (variável Y). A análise de regressão é elaborada com pares de dados obtendo a curva que melhor se ajuste com a resistência do concreto.

A Tabela 2.3 apresenta propostas de equações para correlação VPU x f_c de acordo com o trabalho de Breyse (2012).

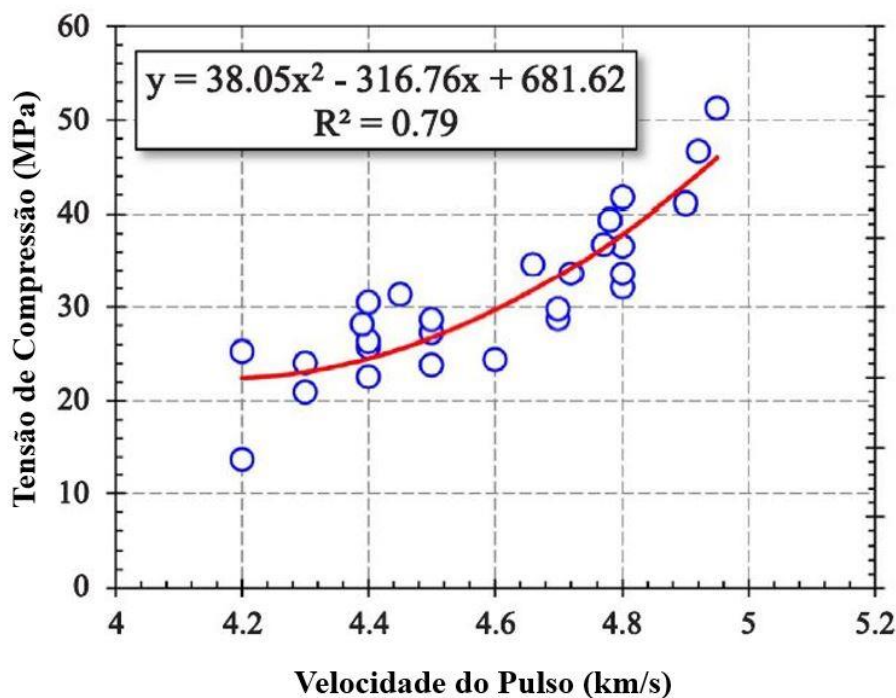
Tabela 2.3 - Proposta de equações de correlação

Tipo de equação	Expressão
Exponencial	$f_c = ae^{(bV)}$
Potência	$f_c = aV^b$
Linear	$f_c = aV + b$
Polinômio (grau 2)	$f_c = aV^2 + bV + c$

Fonte: Adaptado Breyse (2012)

A Figura 2.16 apresenta a curva de correlação simples VPU x f_c proposta por Rashid e Waqas (2017), tal correlação foi elaborado através de nove diferentes traços de concreto variando a relação água/cimento de 0,5 a 0,25. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova cúbicos (150 mm x 300 mm) nas idades de 7, 28 e 56 dias.

Figura 2.16 - Curva de correlação simples VPU x f_c



Fonte: Adaptado Rashid e Waqas (2017)

2.3.4.1 Critérios de comparação de curvas de correlação

Conforme revisão de literatura apresentada nos itens anteriores, a presente pesquisa almeja elaborar equações de correlação simples entre VPU x f_c , tais equações serão comparadas com equações propostas por outros autores, dentre eles, Qasrawi (2000), Evangelista (2002), Machado (2009), Shariati et al. (2011), Mohammed (2010), Pucinotti (2015), Rashid e Waqas (2017), Vicentini e Ferrari (2020). Também serão elaboradas curvas de correlação simples entre VPU x E, tais equações serão comparadas com equações propostas por Rodrigues e Figueiredo (2003) e Toralles et al. (2010).

Através deste critério de comparação é possível analisar as possíveis diferenças nos resultados obtidos, bem como, comparar resultados experimentais com resultados analíticos. Demonstrando a importância da elaboração de curvas de correlação de acordo com a região do concreto estudado.

As Tabelas 2.4 e 2.5 apresentam as equações propostas por cada autor para estimativa de f_c e E.

Tabela 2.4 - Equações propostas por outros autores para correlação VPU x f_c

Autor	Equação	R ²	f_c (MPa)	Corpo de Prova	Agregado
Qasrawi (2000)	$f_c = 36,72(VPU) - 129,077$	0,9562	6,0 a 72,0	Cubo (150 mm)	Diversos
Evangelista (2002)	$f_c = 0,0025 \cdot e^{2,138(VPU)}$	0,69	10,8 a 53,0	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (19 mm)
	$f_c = 0,0124 \cdot e^{1,8146(VPU)}$	0,96	10,1 a 46,0	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (9,5 mm)
	$f_c = 0,0031 \cdot e^{2,062(VPU)}$	0,92	8,0 a 48,7	Cilíndrico (150 x 300) mm	Sienito (19 mm)
Machado (2009)	$f_c = 0,036 \cdot (VPU)^{4,696}$	0,64	12,9 a 61,2	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (19 mm) e Sienito (19 mm)
Shariati et al. (2011)	$f_c = 15,533(VPU) - 34,358$	0,9194	6,0 a 50,0	Cubo (150 mm)	Indeterminado
Mohammed (2010)	$f_c = 1,7564e^{0,0008(VPU)}$	0,9905	20,0 a 40,0	Cubo (150 mm)	Indeterminado
Pucinotti (2015)	$f_c = 0,184e^{0,0011(VPU)}$	0,82	5,0 a 26	Cilíndrico (150 x 300) mm	
Rashid e Waqas (2017)	$f_c = 38,05(VPU)^2 - 316,76(VPU) + 681,62$	0,79	15,0 a 50,0	Cubo (150 mm)	Indeterminado (20 mm)
Vicentini e Ferrari (2020)	$f_c = 23,612(VPU)^2 - 176,69(VPU) + 355,92$	0,58	23,0 a 49,7	Cilíndrico (150 x 300) mm	Basalto (19 mm)

Fonte: Autor (2020)

Tabela 2.5 - Equações propostas por outros autores para correlação VPU x E

Autor	Equação	R ²	Tipo de cimento	Corpo de Prova	Agregado
Rodrigues e Figueiredo (2003)	$E_c = 6 \times 10^{-12}(VPU)^{3,4917}$	0,734	CP II Z 32 RS	Cilíndrico (150 x 300) mm	Granito e Micaxisto
	$E_c = 2 \times 10^{-13}(VPU)^{3,91717}$	0,817			
Machado (2005)	$E_c = 7,724(VPU)^2 - 48,97(VPU) + 94,24$	0,814	CP III (Equivalente ao ASTM Tipo IS)	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (19 mm) e Sienito (19 mm)
Carbonari et al. (2010)	$E_c = 1,0752e^{0,0007(VPU)}$	0,987	CP V - ARI		Areai de britagem (4,8mm), Brita zero (9,5 mm) e Brita 1 (19,0 mm)
Yildirim e Sengul (2010)	$E_c = 6e^{0,076(VPU^2)}$	0,96	CP I - 32	Cilíndrico (150 x 300) mm	Diversos

Fonte: Autor (2020)

2.4 MÉTODO DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA

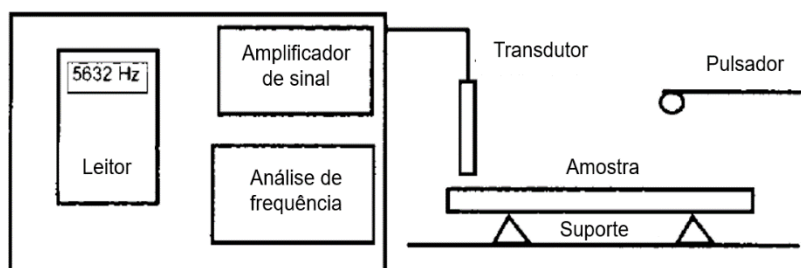
A técnica de ressonância acústica consiste em registrar a frequência de ressonância fundamental através da resposta acústica. Este método permite o cálculo de parâmetros como módulo de Elasticidade dinâmico, coeficiente de Poisson dinâmico entre outros.

Dentre as técnicas experimentais para ensaios dinâmicos, cita-se, a técnica de excitação por impulso, que consiste em aplicar uma leve pancada no CPs no sentido de vibração de interesse que induz a uma resposta acústica obtida através de captadores de áudio, tal método permite a estimativa dos parâmetros dinâmicos do CP. O esquema do ensaio de acordo com a ASTM E1876 é apresentado na Figura 2.17.

Para a realização do ensaio, as normas ASTM E1876 (2015) e ASTM C215 (2014) apresentam a metodologia a ser utilizada para caracterização dos módulos de Elasticidade dinâmicos do concreto por meio da frequência fundamental.

As referidas normas internacionais citadas, no entanto, apresentam pequenas diferenças, sendo elas, a ASTM E1876 (2015) descreve a técnica para o cálculo do módulo de Elasticidade dinâmico de forma geral, sem especificar o tipo de material, enquanto a ASTM C215 (2014) apresenta a caracterização de corpos de prova de concreto.

Figura 2.17 - Esquema do ensaio acústico



Fonte: Adaptado, ASTM E1876 (2015)

Para a realização do ensaio acústico, uma das ferramentas disponíveis é o equipamento Sonelastic[®], desenvolvido pela ATCP Engenharia Física, este equipamento tem sido utilizado para a caracterização das propriedades de módulos elásticos de materiais a partir de frequências naturais de vibração.

Diógenes et al. (2011) utilizou o equipamento Sonelastic[®] para determinar o módulo de Elasticidade dinâmico (E_{cd}) de CPs de concreto, os resultados experimentais apresentaram valores satisfatórios com variação dos valores de frequência natural inferior a 1% quando

comparados com resultados obtidos por outros sistemas de aquisição de dados de frequência natural para realização de ensaios de módulo de Elasticidade dinâmico através de ENDs.

O desenvolvimento do ensaio para a determinação do módulo de Elasticidade dinâmico, obtido através da frequência ressonante será de acordo com a ASTM E1876 (2015) e ASTM C215 (2014), bem como, com considerações de autores, dentre eles, Cossolino e Pereira (2010), Malhotra e Sivasundaram (2004) e Otani e Pereira (2017).

2.4.1 Descrição do método

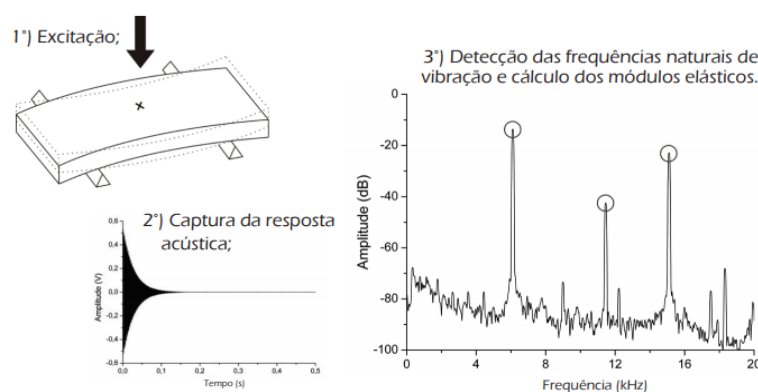
Para se obter a resposta acústica do corpo de prova aplica-se uma leve pancada no sentido de vibração de interesse induzindo a uma resposta acústica. Tal resposta é composta por uma ou mais frequências naturais de vibração, que permitem o cálculo do módulo de Elasticidade (DIÓGENES et al., 2011).

Como já citado, para a realização do ensaio, o equipamento Sonelastic[®] é um instrumento desenvolvido pela ATCP Engenharia Física que realiza a caracterização por meio de ensaio não destrutivo obtendo o módulo de Elasticidade dinâmico dos materiais a partir das frequências naturais de vibração.

O método consiste em aplicar um impacto mecânico na amostra ensaiada, em seguida um microfone capta a resposta acústica do material, o software do equipamento Sonelastic[®] realiza por meio de transformadas de Fourier (FFT) transformando o problema do domínio de tempo para o da frequência. Com base nesta relação a partir das frequências naturais de vibração é possível realizar o cálculo dos módulos de Elasticidade (GIDRÃO, 2015).

A Figura 2.18 apresenta o equipamento típico para o ensaio de excitação por impulso, utilizando o Sonelastic[®].

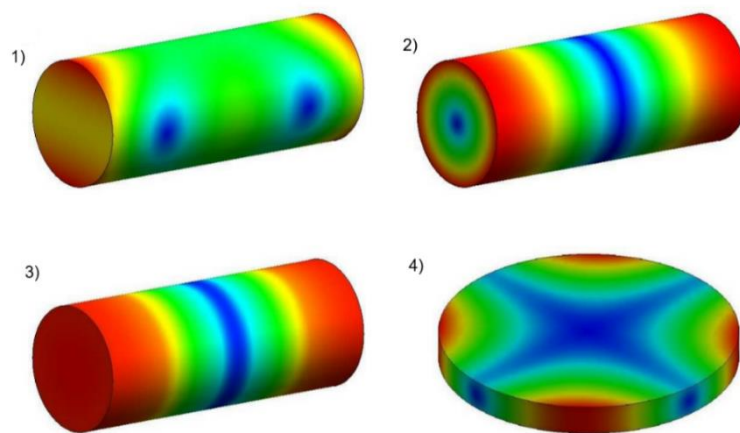
Figura 2.18 - Ensaio de excitação por impulso utilizando o Sonelastic[®]



Fonte: ATCP (s.d)

De acordo com Otani e Pereira (2017) existe uma frequência fundamental característica para os modos de vibração que um CP está sujeito. Os principais modos de vibração de cilindros são delimitados em flexional, torcional, longitudinal e planar. A Figura 2.19 apresenta os principais modos de vibração que um CP está sujeito, onde as regiões em azul apresentam os pontos de amplitude de vibração mínima e as regiões em vermelho a amplitude de vibração máxima.

Figura 2.19 - Modos de vibração de corpos de prova: 1) flexional, 2) torcional, 3) longitudinal e 4) planar



Fonte: Otani e Pereira (2017)

O módulo de Elasticidade longitudinal pode ser obtido através dos modos de vibração fundamental no sentido flexional e longitudinal. Para a correlação do módulo de Elasticidade dinâmico com ensaio de compressão, é indicada a utilização do modo de vibração longitudinal, sendo este, o módulo de Elasticidade dinâmico referente ao comprimento do corpo de prova (OTANI e PEREIRA, 2017).

Para a realização do ensaio através da técnica de excitação por impulso a norma ASTM E1876 (2015) fornece as equações para o cálculo do módulo de Elasticidade dinâmico longitudinal ($E_{d,l}$) em CPs cilíndricos.

O cálculo do módulo de Elasticidade dinâmico longitudinal ($E_{d,l}$) para corpos de prova de seção circular é obtido através da equação 2.5:

$$E_{d,l} = 16 m f_l^2 \left(\frac{L}{\pi D^2 K} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

$E_{d,l}$ é o módulo de Elasticidade longitudinal dinâmico em pascal (Pa);

L é o comprimento do corpo de prova em mm;

D é o diâmetro do corpo de prova em mm;

m é a massa do corpo de prova em gramas;

f_l é a frequência fundamental longitudinal em Hertz;

K é o fator de correção do modo longitudinal.

O fator de correção K é obtido pela equação 2.6.

$$K = 1 - \left(\frac{\pi^2 \mu^2 D^2}{8 L^2} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

L é o comprimento do corpo de prova em mm;

D é o diâmetro do corpo de prova em mm;

μ é o coeficiente de Poisson.

2.4.2 Vantagens, aplicações e limitações

De acordo com a norma ASTM E1876 (2015) o método de ressonância acústica apresenta vantagens, não exige a excitação contínua, é um método de natureza não-destrutiva, o teste é realizado de maneira simples, pode ser utilizado para o controle de qualidade do concreto, é possível realizar análises do módulo de Elasticidade de acordo com a exposição ambiental ou condição de cura.

A mesma norma cita algumas limitações do método, não se aplica para regiões que apresentam descontinuidade como fissuras, rachaduras ou vazios.

O método deve ser utilizado em geometrias regulares (circulares, placas e retangulares) as quais possuem equações analíticas para determinação das propriedades elásticas, não sendo indicado utilizar o método de ressonância acústica para determinar propriedades elásticas de materiais com outra geometria.

Bordas com chanfros não são considerados nas equações, regiões que apresentam chanfros induzem a erros nas equações para o cálculo de módulo de Elasticidade dinâmico.

O método da técnica de excitação por impulso assume que o corpo de prova está vibrando livremente, sem nenhuma restrição significativa, dessa maneira os corpos de prova devem ser fabricados e posicionados de acordo para permitir que a vibração ocorra livremente.

2.4.3 Fatores que influenciam nos resultados

Segundo Malhotra e Sivasundaram (2004), diversos fatores apresentam interferência nos resultados do módulo de Elasticidade dinâmico através da ASTM C215 (2014), tais como, a influência das proporções das misturas e propriedades dos agregados, tamanho da amostra e influência das condições de cura.

2.4.3.1 Influência da proporção das misturas e propriedades dos agregados

O módulo de Elasticidade dinâmico do concreto é afetado pelos módulos de Elasticidade de seus materiais constituintes e suas proporções relativas. Para uma determinada composição de cimento, ou seja, a mesma relação água/cimento, o módulo de Elasticidade do concreto endurecido aumenta com o aumento da porcentagem de agregado total.

Outro fator é que o aumento da relação de água na mistura de concreto ou o volume de ar retido, reduz o módulo de Elasticidade dinâmico (MALHOTRA e SIVASUNDARAM, 2004).

2.4.3.2 Tamanho da amostra

Malhotra e Sivasundaram (2004) citam as pesquisas onde demonstraram que o módulo de Elasticidade dinâmico do concreto varia de acordo com o tamanho da amostra usada nas medições. Onde as amostras maiores devido a sua dimensão e peso, possuem menores frequências de ressonância fundamental.

2.4.3.3 Influência das condições de cura

Malhotra e Sivasundaram (2004) também citam resultados que embora o módulo de Elasticidade dinâmico dependa do teor de umidade, a mudança no módulo de Elasticidade com o procedimento de secagem é relativamente pequena após cerca de 3 a 4 dias de secagem exposta ao ar. Se o concreto for mantido em cura úmida, o módulo de Elasticidade aumenta com a idade, caso seja deixado para secagem, o módulo de Elasticidade pode diminuir com a idade.

De acordo com Malhotra e Sivasundaram (2004) as condições de cura apresentam fatores que influenciam de maneira significativa a determinação do módulo de Elasticidade dinâmico, a menos que sejam necessárias condições específicas de cura é indicada a cura úmida.

2.4.4 Correlação entre o módulo de Elasticidade E_d x E_c

Diógenes et al. (2011) apresentaram correlações satisfatórias para estimar o módulo de Elasticidade (E_c) do concreto a partir de ensaios dinâmicos não destrutivos utilizando a técnica de excitação por impulso.

Os valores encontrados para o módulo dinâmico (E_{cd}) permaneceu em um intervalo 20 a 40% do módulo (E_c) obtido através de ensaios estáticos.

A pesquisa de Diógenes et al. (2011) estimou o módulo de Elasticidade estático (E_c) do concreto por meio de equações de correlação entre os módulos de Elasticidade dinâmicos obtidos através da ressonância acústica do material, a diferença entre os valores obtidos por Diógenes et al. (2011) com as equações propostas pelo código britânico BS 8110 – 2 (1985) e equação por Lyndon e Baladran (1986), foram menores que 5% .

2.5 MÉTODO DO ESCLEROMETRO DE REFLEXÃO

Este método foi idealizado pelo suíço Ernst Schmidt, em 1948, levando seu nome como esclerômetro de Schmidt, o método de dureza superficial por meio do esclerômetro de reflexão é um dos métodos de ensaio não destrutivos mais antigos e muito utilizados até os dias de hoje (NEVILLE, 1997).

A norma internacional ASTM C805/C805M (2018) e a brasileira ABNT NBR 7584 (2012) apresentam a metodologia para a realização do ensaio de dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.

2.5.1 Descrição do método

O método consiste em submeter a superfície do concreto a um impacto de maneira padronizada usando uma determinada massa com uma dada energia, onde, em seguida é medido o valor do índice esclerométrico (IE) (EVANGELISTA, 2002).

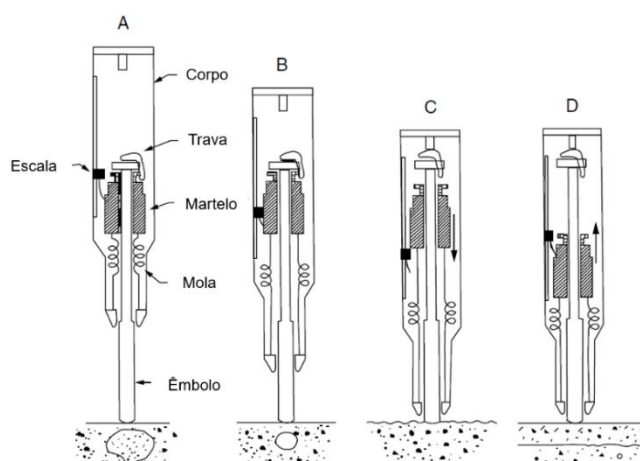
A leitura da dureza medida no valor do IE é relativa ao concreto mais próximo da superfície, dessa maneira quanto menos poroso for o concreto maior será a leitura do IE (BRAYSSE, 2012).

O peso do equipamento utilizado é de aproximadamente 1,8 kg, o que permite ser utilizado tanto em campo quanto em laboratório (MALHOTRA, 2004).

O ACI 228. 1R (2013) descreve o dispositivo pelos seguintes equipamentos, corpo do equipamento, êmbolo, martelo e mola principal. O ensaio consiste em posicionar o êmbolo sobre a superfície de concreto a ser ensaiada, o mesmo é empurrado em direção a superfície,

estendendo a mola no interior do dispositivo, após toda extensão da mola o martelo é conectado na parte superior do corpo do instrumento. Assim que a trava é liberada a mola puxa o martelo, quando o martelo impacta sobre a guia do êmbolo o mesmo é refletido, com o recuo do martelo move-se o indicador de escala, registrando a distância do reflexo, esta escala é numerada variando de 10 a 100, o valor registrado é chamado de IE. A Figura a 2.20 apresenta o esquema de execução do ensaio.

Figura 2.20 - Esquema de execução do ensaio de IE



Fonte: Adaptado Malhotra (2004)

2.5.2 Vantagens, aplicações e limitações

O ensaio de IE apresenta vantagens como, o equipamento para a realização do ensaio é leve, sua operação não apresenta grau de complexidade, baixo custo para a realização do ensaio, os dados são obtidos de maneira rápida e não apresentam danos à superfície da estrutura ensaiada. É um método que pode ser utilizado para monitoramento da resistência ao longo do tempo, como também para estimar a resistência do concreto (EVANGELISTA, 2002).

A norma ASTM C805/C805M (2018) cita algumas das aplicações do método IE, dentre elas, verificar a uniformidade do concreto, delinear variações no concreto ao longo da estrutura e estimar a resistência do concreto no local por meio da elaboração de curvas de correlação.

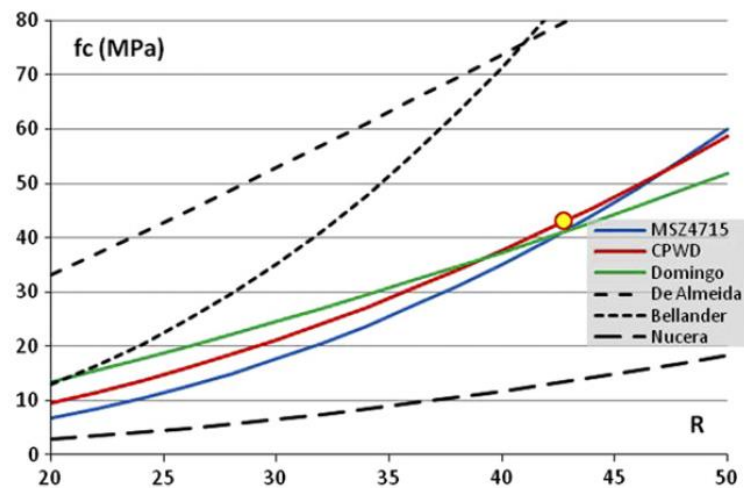
Ainda de acordo com a ASTM C805/805M (2018), a utilização de instrumentos diferentes pode fornecer leituras diferentes, nestes casos devem ser realizados testes comparativos em cada superfície de concreto de modo a determinar a magnitude das diferentes leituras de cada instrumento.

Breyse (2012) descreve pesquisas de outros autores que permitiram verificar uma grande variabilidade nas equações de correlação para estimar a resistência do concreto. A

Figura 2.21 apresenta a variabilidade que pode ocorrer em diferentes curvas de correlação. Em alguns casos a alta variabilidade pode ser explicada devido à falta de cuidado na análise dos resultados estatísticos.

O referido autor ainda cita que não é indicado a utilização de correlações de diferentes modelos de concreto para a estimativa da resistência à Compressão.

Figura 2.21 - Variação entre curvas de correlação IE x f_c



Fonte: Breysse (2012)

Outro fato importante é relatado pela ABNT NBR 7584 (2012) que ressalta que o método IE não pode substituir outros métodos, devendo ser considerado como método adicional ou um ensaio complementar.

2.5.3 Fatores que influenciam nos resultados

2.5.3.1 Superfície do ensaio

A ABNT NBR 7584 (2012) cita a influência da superfície no resultado do ensaio. O ensaio deve ser realizado em superfície lisa, um dos métodos para preparo da superfície é o polimento enérgico com prisma ou disco de carborundum. A BS 1881: Parte 202 (1986) cita que diferentes preparos da superfície podem apresentar resultados variáveis ao ensaio, podendo levar a erros consideráveis se os resultados não forem comparados.

Segundo a ASTM C805/805M (2018) o ensaio deve ser realizado posicionando o esclerometro na posição perpendicular à superfície do teste. Caso o ensaio seja realizado em uma posição diferente o mesmo deverá sofrer correções na leitura de acordo com dados fornecidos pelo fabricante.

2.5.3.2 Tamanho, forma e rigidez do elemento a ser ensaiado

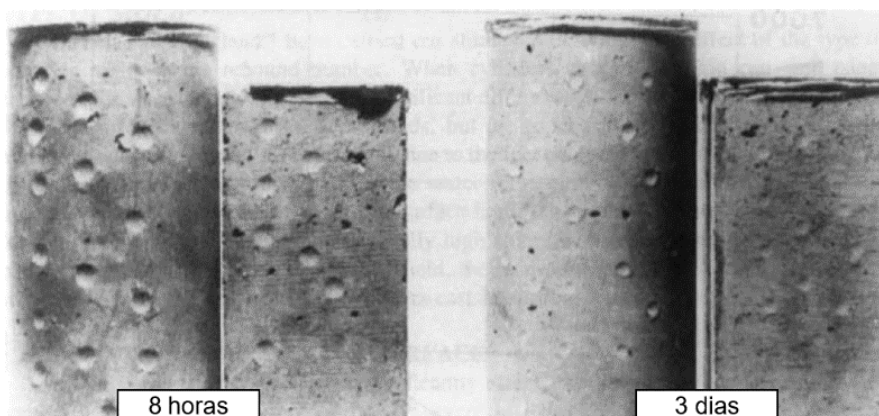
De acordo com Malhotra (2004), as amostras não devem apresentar deslocamento ou vibrações durante a realização do ensaio. Indica-se a utilização de CPs cilíndricos de seção 150 x 300 mm devidamente fixados ou apoiados antes que o ensaio seja realizado.

2.5.3.3 Idade do concreto

Malhotra (2004) cita pesquisas que indicam que o ganho de dureza superficial do concreto é rápido até a data de 7 dias e que após esta data o concreto não apresenta o mesmo ganho.

Ainda conforme o referido autor, apesar da condição de ganho de resistência superficial do concreto, não é indicado a execução do ensaio de esclerometria em concretos nas primeiras idades ou com f_{ck} menor que 7 MPa. A execução do ensaio esclerométrico nas primeiras idades do concreto poderá apresentar danos em sua superfície. A Figura 2.22 apresenta marcas causadas na superfície de corpos de prova cilíndricos, com idades 8 horas e 3 dias.

Figura 2.22 - Marcas na superfície de corpos de prova cilíndricos



Fonte: Adaptado Malhotra (2004)

2.5.3.4 Superfície e condições de umidade interna do concreto

De acordo com a BS 1881: Parte 202 (1986), superfícies úmidas submetidas ao ensaio IE apresentam leituras menores do que superfícies secas. Essa diferença pode ser considerável, chegando a valores 20% menores.

O grau de saturação do concreto e a presença de umidade tem um efeito decisivo sobre os resultados. Estudos de amostras bem curadas e testadas em condições de superfície úmidas, apresentaram leituras de rebote 5 pontos mais baixos do que quando é testado em concreto

totalmente seco. Concretos com diferença de idade de 3 anos, apresentaram até 10 a 12 pontos em número de rebote, este ensaio realizado com amostras úmidas e amostras secas, esta diferença no número de rebote, representa uma diferença de 14 MPa na resistência à compressão (MALHOTRA, 2004).

2.5.3.5 Tipo de agregado graúdo

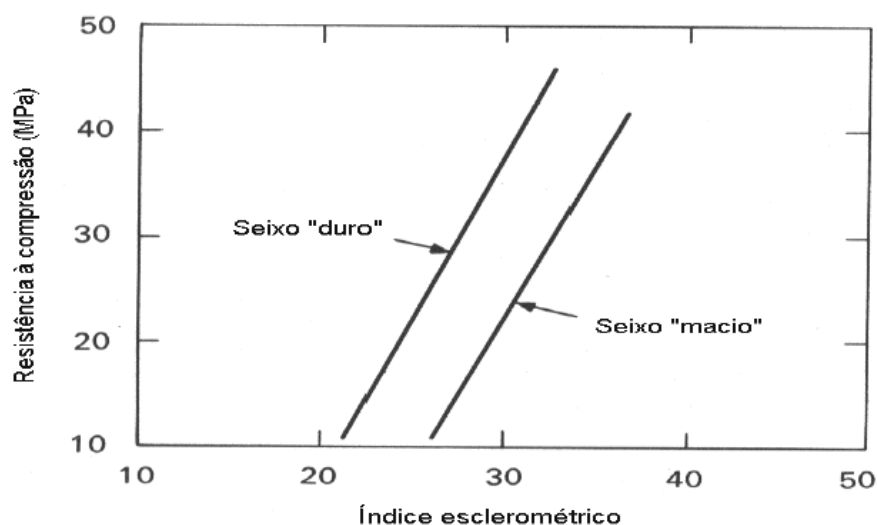
Conforme a ABNT NM 78 (1996) não se deve comparar resultados de determinações de concretos preparados com agregados de diferentes composições petrográficas.

Para a BS 1881: Parte 202 (1986), concretos compostos por agregados convencionais podem apresentar correlações similares, porém, os resultados devem ser confirmados para que esta possibilidade seja aceita. Para o caso de concretos com agregados leve deve ser elaborado curvas próprias.

De acordo com Malhotra (2004), em pesquisas de autores onde concretos foram elaborados com agregado graúdo de calcário moído, os números de rebote são aproximadamente 7 pontos mais baixos que concretos feitos com cascalho grosso como agregado, apresentando uma diferença de 7 MPa na resistência à Compressão.

Conforme Bungey (2006), agregados duros e macios podem interferir nos resultados, a Figura 2.23 mostra uma curva de correlação com a resistência à compressão f_c e IE para concretos com agregados de seixo duro e macio, sendo que a composição feita com agregado mais rígido apresenta valor de IE menor do que concretos compostos por agregado macio.

Figura 2.23 - Curva de Resistência à compressão com diferentes agregados



Fonte: Adaptado de Bungey (2006)

2.5.3.6 Tipo de cimento

De acordo com a BS 1881: Parte 202 (1986) a diferença da correlação da resistência a compressão para diferentes tipos de cimento Portland é menor do que 10%. Apresentando uma baixa influência na utilização de diferentes tipos de cimento para a estimativa da resistência à compressão a partir do ensaio de esclerometria.

Ainda conforme a referida norma, nos casos em que se utiliza cimento aluminoso o mesmo pode apresentar resultados até 100% maiores do que valores obtidos utilizando o cimento Portland comum.

Bungey (2006) também atesta a baixa influência na diferença do teor de cimento para a dureza superficial do concreto e cita que cimentos supersulfatados podem apresentar resistência 50% inferior do que indicado em uma correlação comparado com cimento Portland.

A ABNT NM 78 (1996) relata que o teor de cimento não apresenta influência significativa na elaboração de curvas de correlação

2.5.3.7 Carbonatação da superfície de concreto

A presença de carbonatação na superfície do ensaio apresenta influência significativa nos resultados da estimativa da resistência à compressão do concreto a partir do ensaio de IE.

Os efeitos da carbonatação ocorre em concretos mais antigos, devido a camada de carbonatação apresentar espessuras elevadas, podendo chegar a vinte milímetros. Nestes casos os valores do ensaio IE pode chegar a 50% maior do que em superfície de concreto não carbonatada (MALHOTRA, 2004).

As normas ABNT NBR 7584 (2012) e ABNT NM 78 (1996) indicam evitar a realização do ensaio IE em regiões carbonatadas, porém, caso o ensaio seja realizado devem ser aplicados coeficiente de correção nos valores obtidos do ensaio.

Breysse (2012) relata que a leitura do IE é relativa a uma camada aproximada de trinta milímetros, tornando a leitura muito sensível as propriedades próximas a superfície, para tanto, a influência da carbonatação no resultado é um dos fatores mais conhecidos, cujo o desenvolvimento progressivo cria camadas mais duras perto da superfície.

O referido autor cita pesquisas que utilizaram dados de edifícios com idade entre 1 e 40 anos e mostraram que, para um concreto com a mesma resistência, o valor da leitura é 4 pontos mais alto no ensaio realizado “*in loco*” do que os ensaios em laboratório.

Conforme a ASTM C805/805M (2018) em casos de regiões com grandes espessuras de carbonatação, a mesma deverá ser removida para a realização dos testes.

2.5.4 Recomendação quanto às curvas de correlação

A ABNT NBR 7584 (2012) indica a construção de curvas de correlação para a estimativa da resistência à compressão do concreto utilizando materiais locais, atentando para os fatores que podem interferir nos resultados.

Em geral empresas fabricantes do aparelho fornecem um gráfico que correlaciona a resistência à compressão do concreto com o IE, porém, estas curvas não correspondem aos concretos elaborados em regiões brasileiras, referindo-se geralmente a concretos produzidos em outros países.

Segundo a ABNT NBR NM 78 (1996) recomenda-se elaborar curvas de correlação com concretos preparados com relação água/cimento variando de 0,4 a 0,7, com intervalos de 0,05, para obter diferentes pontos na curva de correlação. Para cada valor da relação água/cimento é recomendável moldar no mínimo 2 CPs. Em seguida determina-se o IE médio para cada CP, e por fim realiza-se o ensaio de resistência à Compressão.

É indicado utilizar CPs cilíndricos de 150 mm x 300 mm, preparados e submetidos a cura úmida. Para a realização do ensaio o corpo de prova deverá estar superficialmente seco permanecendo 48 horas em ambiente de laboratório antes da realização do ensaio.

Os impactos sobre o corpo prova devem ser aplicados com o mesmo devidamente sustentando entre os pratos do equipamento de prensa, com uma força igual a 15% da carga estimada de ruptura.

Possuindo o IE médio dos corpos de prova e os valores dos mesmos ensaiados à compressão é necessário a determinação de um ponto com relação aos dois eixos cartesianos. A representação nas abcissas do valor do IE médio e nas ordenadas do valor da resistência à compressão dos corpos de prova, onde pode-se traçar uma curva de correlação para um determinado tipo de concreto.

A análise de regressão é feita com pares de dados obtendo a curva que melhor se ajuste com a resistência do concreto. A Tabela 2.6 apresenta propostas de equações para correlação IE x f_c de acordo com o trabalho de Breysse (2012).

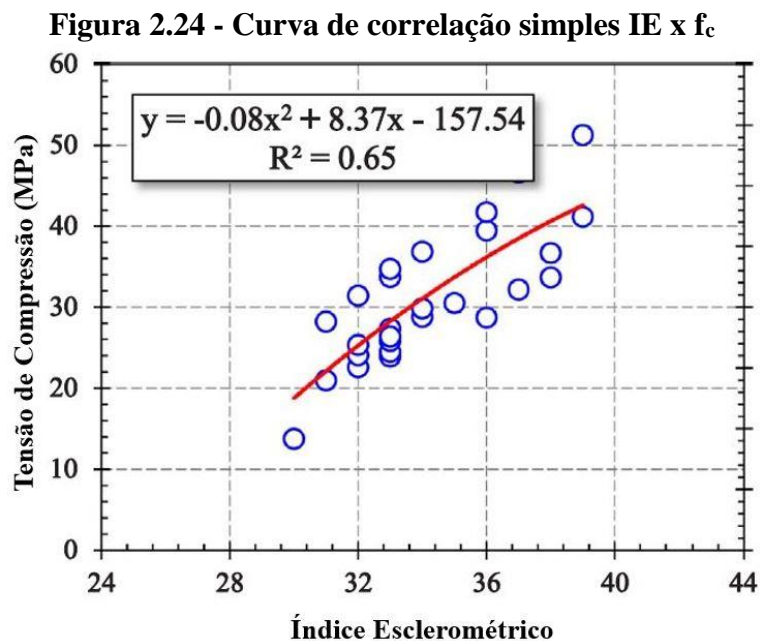
Tabela 2.6 - Proposta de equações de correlação

Tipo de equação	Expressão
Exponencial	$f_c = ae^{(bIE)}$
Potência	$f_c = aIE^b$
Linear	$f_c = aIE + b$
Polinômio (grau 2)	$f_c = aIE^2 + bIE + c$

Fonte: Adaptado Breysse (2012)

No trabalho de Vicentini e Ferrari (2020) o valor de coeficiente de determinação obtido foi $R^2 = 0,6115$ através de uma correlação simples, polinômio de grau 2, entre o ensaio IE x f_c para concretos ensaiados nas idades de 7, 14, 28, 56 e 91 dias, com resistência à compressão variando entre 20 e 50 MPa.

A Figura 2.24 apresenta a curva de correlação simples IE x f_c proposta por Rashid e Waqas (2017), tal correlação foi elaborada através de nove diferentes traços de concreto variando a relação água/cimento de 0,5 a 0,25. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em corpos de prova cúbicos (150 mm) nas idades de 7, 28 e 56 dias



Fonte: Adaptado Rashid e Waqas (2017)

2.5.5 Critérios de comparação de curvas de correlação

Conforme a revisão de literatura apresentada nos itens anteriores a presente pesquisa irá elaborar equações de correlação simples entre IE x f_c e IE x E, tais equações serão comparadas com equações propostas por outros autores, dentre eles, Qasrawi (2000), Evangelista (2002), Machado (2009), Shariati et al. (2011), Mohammed (2010), Pucinotti (2015), Rashid e Waqas (2017) e Vicentini e Ferrari (2020).

A Tabela 2.7 apresenta as equações propostas por cada autor para estimativa de f_c .

Tabela 2.7 - Equações propostas por outros autores para correlação IE x f_c

Autor	Equação	R ²	f_c (MPa)	Corpo de Prova	Agregado
Qasrawi (2000)	$f_c = 1,353(IE) - 17,393$	0,88	6,0 a 42,0	Cubo (150 mm)	Diversos
Evangelista (2002)	$f_c = 0,033(IE)^{2,02}$	0,82	10,8 a 53,0	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (19 mm)
	$f_c = 0,007(IE)^{2,477}$	0,90	10,1 a 46,0	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (9,5 mm)
	$f_c = 0,0252(IE)^{2,128}$	0,78	8,0 a 48,7	Cilíndrico (150 x 300) mm	Sienito (19 mm)
Machado (2009)	$f_c = 0,026.(IE)^{2,044}$	0,90	12,9 a 61,2	Cilíndrico (150 x 300) mm	Gnaisse (19 mm) e Sienito (19 mm)
Shariati et al. (2011)	$f_c = 1,7206(IE) - 26,595$	0,94	30,0 a 58,0	Cubo (150 mm)	Indeterminado
Mohammed (2010)	$f_c = 9,5879e^{0,0384(IE)}$	0,9916	20,0 a 40,0	Cubo (150 mm)	Indeterminado
Pucinotti (2015)	$f_c = 0,00724(IE)^{2,012}$	0,82	5,0 a 26	Cilíndrico (150 x 300) mm	
Rashid e Waqas (2017)	$f_c = -0,08(IE)^2 + 8,37(IE) - 157,54$	0,65	15,0 a 50,0	Cubo (150 mm)	Indeterminado
Vicentini e Ferrari (2020)	$f_c = 0,0546(IE)^2 - 2,3253(IE) + 44,905$	0,61	20 a 50,0	Cilíndrico (150 x 300) mm	Basalto (19 mm)

Fonte: Autor (2019)

2.6 MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS COMBINADOS

A combinação de mais de um ENDs para a elaboração de curvas de correlação é cada vez mais utilizada, pois, tem como principal função proporcionar um aumento no nível de confiança dos resultados.

Esta forma de análise de resultados relacionando diferentes ENDs é utilizada em pesquisas elaboradas por vários autores, dentre eles, Evangelista (2002), Machado (2009), Shariati et al. (2011), Rashid e Waqas (2017), Vicentini e Ferrari (2020).

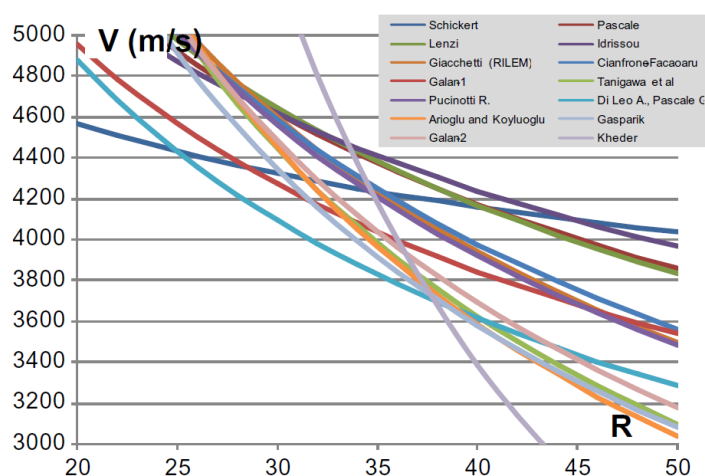
Pesquisas desenvolvidas por Evangelista (2002) apresentaram melhora de de 3% a 16% no coeficiente de determinação (R^2) para a estimativa da resistência à compressão do concreto utilizando métodos combinado entre os ensaios VPU x IE x f_c .

Já Vicentini e Ferrari (2020), encontraram melhora de 7% na estimativa da resistência à compressão do concreto utilizando a combinação múltipla entre os ensaios VPU x IE x f_c .

Alwash et al. (2015) relata que a combinação entre o ensaio VPU e IE é muito conveniente uma vez que as duas técnicas são sensíveis a variações de propriedades diferentes, como exemplo, o aumento do teor de umidade do concreto aumenta a velocidade da onda, porém diminui o valor do IE.

Breysse (2012) cita a variabilidade apresentada em modelos de combinação múltipla, a Figura 2.25 apresenta diferentes curvas elaboradas a partir de equações de dupla potência para um concreto de resistência de 30 MPa. O mesmo explica que a variabilidade apresentada pode estar relacionada com fatos como, as correlações serem elaboradas em laboratório, diferentes propriedades do concreto ou erros nas medições dos parâmetros do ensaio.

Figura 2.25 - Comparação de curvas Iso-Resistentes



Fonte: Breysse (2012)

De acordo com Alwash et al. (2015) a variabilidade encontrada por diversos autores na elaboração de curvas de correlação pode ser devido a fatores de incertezas nas medições do ENDS, fatores não controlados (umidade, carbonatação, etc.) ou incertezas como, número de corpos de prova a serem estudado e calibração do método.

Ainda de acordo com Alwash et al. (2015) a metodologia combinando técnicas ENDS foi inicialmente proposta pela Rilem (1993). Diversas pesquisas propõem curvas de correlação por meio de métodos combinados para a estimativa da resistência concreto, sendo a combinação dos ENDS de VPU e IE, chamada de SonReb.

A Rilem (1993) ainda que relata que a combinação múltipla entre dois ou mais métodos ENDS para construção de curvas de correlação seja vantajoso:

- Cada método deverá fornecer informações sobre diferentes propriedades que influenciem a resistência do concreto;
- Cada método deve ser apropriado para ensaiar elementos de tamanhos e formas diferentes;
- Os ensaios devem ser elaborados de maneira rápida;
- Os métodos de ensaio utilizados devem apresentar a estimativa de resistência à compressão com nível semelhante de precisão;
- Os métodos de ensaio não devem afetar o desempenho estrutural da amostra.

2.6.1 Método de combinação múltipla SonReb

O método SonReb consiste na elaboração de um ábaco contemplando curvas de Iso-resistência envolvendo duas ou mais grandezas de ensaios ENDS e ensaios destrutivos a partir de um concreto de referência.

Para o traçado de curvas de Iso-resistência, inicialmente determina-se a composição do concreto que servirá como referência para elaboração do ábaco. De modo a se obter valores experimentais com diferentes resistências pode se variar os parâmetros de:

- Relação água/cimento;
- Grau de compactação;
- Maturidade do concreto;
- Condições de cura;
- Proporção de agregado fino
- Teor de cimento.

Para a construção de curvas de Iso-resistência relacionando os ensaios ENDS de VPU e IE, a Rilem (1993) indica os seguintes procedimentos para uma boa análise dos resultados:

- As amostras de concreto devem receber cura úmida sendo removidas 24 horas antes da realização dos ensaios;
- Para o ensaio VPU devem ser efetuadas de 2 a 4 medições para cada corpo de prova. A diferença entre a maior e menor velocidade de onda deve ser menor do 5%;
- O ensaio IE é recomendado um mínimo de 9 leituras em diferentes posições para cada corpo de prova;
- Após realização dos ensaios ENDS plota-se o gráfico correspondente para o concreto, relacionando os resultados destrutivos e não destrutivos, um exemplo de gráfico é combinado os ensaios VPU x IE x f_c e VPU x IE x E;
- Valores de VPU nas abscissas e IE nas ordenadas;
- Valores de VPU nas abscissas e f_c nas ordenadas.

Existem casos que o concreto a ser estudado, apresenta dosagem diferente do concreto de referência utilizado para a elaboração das curvas de Iso-resistência, para isso a Rilem (1993) indica a utilização de coeficientes de influência C_t , onde, os mesmos levam em consideração fatores como, tipo de cimento, teor de cimento, tipo de agregado, proporção de finos, dimensão máxima do agregado graúdo e uso de aditivos. Tais coeficientes são aplicados de modo a justificar os efeitos que cada um desses fatores pode interferir no resultado final da resistência do concreto.

O coeficiente de influência C_t pode ser determinado de duas maneiras, a primeira é determinando de forma experimental baseado nos testes destrutivos e não destrutivos, conforme a equação 2.7.

$$C_t^{exp} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{R_{pr,i}}{R_{ref,i}} \quad (2.7)$$

Onde:

$R_{pr,i}$ é a resistência do concreto testado;

$R_{ref,i}$ é a resistência do concreto testados, estimado pelas curvas de iso-resistência do concreto de referência.

Outra maneira de se determinar o coeficiente de influência é com base na superposição dos fatores de contribuição, este cálculo é fornecido na equação 2.8.

$$C_t^{stheor} = C_c C_d C_a C_f C_p C_m \quad (2.8)$$

Onde:

C_c tipo de cimento;

C_d teor de cimento;

C_a tipo de agregado;

C_f proporção do agregado;

C_p diâmetro máximo do agregado;

C_m presença de aditivos.

Os coeficientes parciais são determinados em um único programa de testes, utilizando a composição do concreto de referência e do concreto a ser testado diferenciando em apenas um dos fatores de influência. A diferença entre os dois conjuntos é obtida pela equação 2.9.

$$C_{x,l} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{R_{pr,i}}{R_{ref,i}} \quad (2.9)$$

Onde:

x, l significa o parâmetro estudado para um dado valor;

$R_{pr,i}$ é a resistência do concreto testado calculada por meio de ensaios destrutivos;

$R_{ref,i}$ é o cálculo da resistência do concreto de referência, estimado a partir de curvas de iso-resistência.

O valor médio do coeficiente de influência que corresponde ao concreto de referência $C_{x,0}$ deve ser igual a 1. Para que esta condição seja estabelecida existem casos onde se faz necessário um ajuste nos coeficientes de influência de acordo com a equação 2.10.

$$C_{x,l}^{fin} = \frac{C_{x,l}}{C_{x,0}} \quad (2.10)$$

Onde:

$C_{x,l}^{fin}$ significa o coeficiente de influência final de um parâmetro estudado para um dado valor;

$C_{x,l}$ é referente ao coeficiente medido e calculados para o concreto testado;

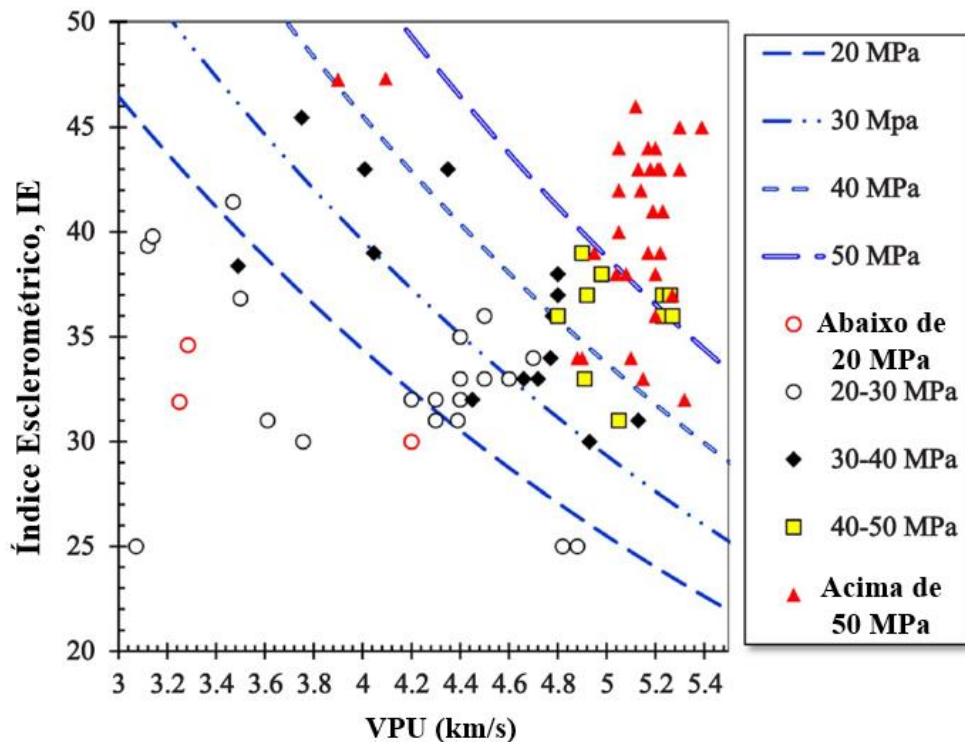
$C_{x,0}$ é o valor correspondente para o concreto de referência.

Para casos em que os dois valores do coeficiente de influência estão disponíveis, as equações devem ser comparadas, caso a diferença entre elas seja menor do que 20% o cálculo do coeficiente de influência total é de acordo com a equação 2.11.

$$C_t^{test} = \frac{2C_t^{exp} + C_t^{stheor}}{3} \quad (2.11)$$

A elaboração de curvas de Iso-resistência permite estimar a resistência para um dado intervalo a partir de ensaios ENDS de acordo com o ábaco elaborado. A Figura 2.26 apresenta uma curva de Iso-resistência elaboradas de acordo com a metodologia SonReb.

Figura 2.26 - Curvas de Iso-Resistência



Fonte: Rashid e Waqas (2017)

A correlação múltipla é elaborada a partir de equações de correlação que apresentem melhor coeficiente de determinação (R^2), entre os valores experimentais obtidos por ENDS e ensaios destrutivos. A Tabela 2.8 apresenta modelos de equações de correlação múltipla propostas por BREYSSE (2012).

Tabela 2.8 - Proposta de equações de correlação múltipla

Tipo de equação	Expressão
Potência dupla	$f_c = aV^bR^c$
Bi-linear	$f_c = a + bV + cIE$
Exponencial	$f_c = ae^{bV}e^{cIE}$

Fonte: Adaptado Breysse (2012)

Conforme a revisão de literatura apresentada nos itens anteriores a presente pesquisa irá elaborar equações de correlação múltiplas entre VPU x IE x f_c e VPU x IE x E, tais equações serão comparadas com equações propostas por outros autores, dentre eles, Evangelista (2002), Machado (2009), Rashid e Waqas (2017), Vicentini e Ferrari (2020), Rilem (1993). A Tabela 2.9 apresenta as equações propostas por cada autor para elaboração de curvas de correlação múltipla VPU x IE x f_c .

Tabela 2.9 - Equações propostas por outros autores para correlação VPU x IE x f_c

Autor	Equação	R²
Evangelista (2002)	$f_c = e^{(-1,554 + 0,0584 IE + 0,750 VPU)}$	0,89
Machado (2009)	$f_c = e^{(0,048 IE + 0,446 VPU)}$	0,99
*Rashid e Waqas (2017)	$f_c = [2f_{c,ref} e^{(k_1 \frac{IE_{obs}}{IE_{ref}})}] (e^{(k_2 \frac{V_{obs}}{V_{ref}})})$	0,80
Rilem (1993)	$f_c = 2,756^{(-10)} \cdot VPU^{2,487} \cdot IE^{1,311}$	--
Vicentini e Ferrari (2020)	$f_c = e^{(1,228+0,057 IE+0,061 VPU)}$	0,89

Fonte: Autor (2020)

* Referencias da curva iso-resistente proposta Rashid e Waqas (2017):

$f_{c,ref}$ - Concreto de referência resistência = 20 MPa;

IE_{obs} - Índice esclerométrico medido durante a realização do ensaio;

IE_{ref} - Índice esclerométrico de referência $IE = 20$;

V_{obs} - Velocidade de onda ultrassônica (km/s) medido durante a realização do ensaio;

V_{ref} - Velocidade de onda ultrassônica (km/s) de referência $V = 3,0 \text{ km/s}$;

k_1 - Constante 1 = 0,70;

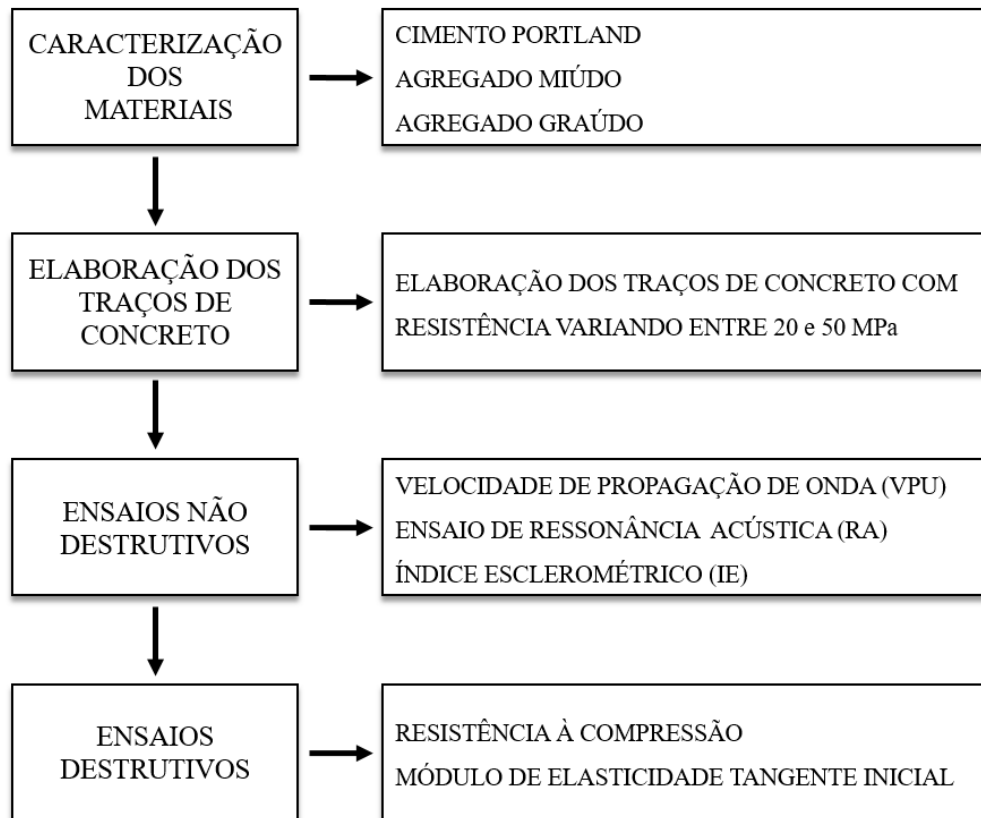
k_2 - Constante 2 = - 0,90.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Afim de cumprir o proposto nos objetivos geral e específicos, serão descritas a seguir os materiais, os ensaios e os métodos empregados no programa experimental deste trabalho.

O referido programa experimental é apresentado de maneira simplificada na Figura 3.1 a seguir.

Figura 3.1 - Programa experimental resumido



Fonte: O autor (2020)

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa foram caracterizados conforme as prescrições normativas referente a cada material. A Tabela 3.1 apresenta a relação dos ensaios realizado durante a caracterização do agregado graúdo e miúdo.

Tabela 3.1 - Relação dos ensaios para caracterização dos agregados

Ensaio de caracterização dos agregados	
Análise granulométrica	- ABNT NBR 7211 (2009) – Agregados para concreto especificação; - ABNT NBR NM 248 (2003) – Determinação da composição granulométrica.
Massa específica	- ABNT NBR NM 52 (2009) – Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.
Massa unitária das condições solta e compactada	- ABNT NBR NM 45 (2009) – Determinação de massa unitária e volume de vazios.
Teor de umidade e absorção de água	- ABNT NBR NM 53 (2003) – Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.
Coefficientes de vazio	- ABNT NBR NM 45 (2009) – Determinação de massa unitária e volume de vazios.

Fonte: O autor (2020)

3.1.1 Caracterização do agregado miúdo

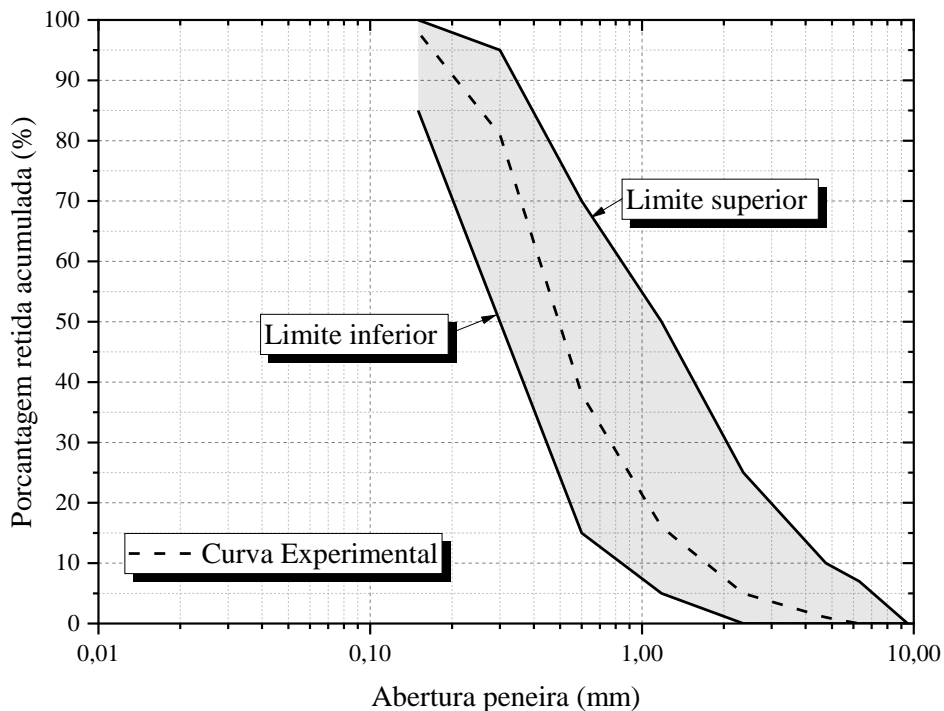
A areia é proveniente da região de Nova Londrina/PR, e sua composição granulométrica é apresentada na Tabela 3.2 e na Figura 3.2. Os resultados obtidos mostram que se trata de uma areia fina com massa específica de $2,64 \text{ kg/dm}^3$, módulo de finura de $2,14 \text{ mm}$ e dimensão máxima igual a $1,18 \text{ mm}$.

Tabela 3.2 - Composição granulométrica da areia

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA							
PENEIRAS (mm)	ENSAIO 1			ENSAIO 2			MÉDIA DO MATERIAL RETIDO ACUMULADO (%)
	MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE RETIDO ACUMULADO (%)		MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE RETIDO ACUMULADO (%)		
9,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,30	1,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1
4,75	3,2	0,6	0,9	0,7	0,1	0,1	0,5
2,36	4,2	0,8	1,7	3,8	0,8	0,9	1,3
1,18	15,7	3,2	4,9	21,4	4,3	5,2	5,0
0,60	85,3	17,1	22,0	112,7	22,6	27,8	24,9
0,30	300,0	60,3	82,3	280,1	56,2	84,1	83,2
0,15	80,4	16,2	98,4	74,9	15,0	99,1	98,8
FUNDOS	7,8	1,6	100,0	4,4	0,9	100,0	100,0
TOTAL	497,7	gramas		498,0	gramas		
DIMENSÃO MÁXIMA Ø Máx = 1,18 mm			MÓDULO DE FINURA MF = 2,14 mm			CLASSIFICAÇÃO DA AREIA AREIA FINA	

Fonte: O autor (2020)

Figura 3.2 - Porcentagem retida acumulada



Fonte: O autor (2020)

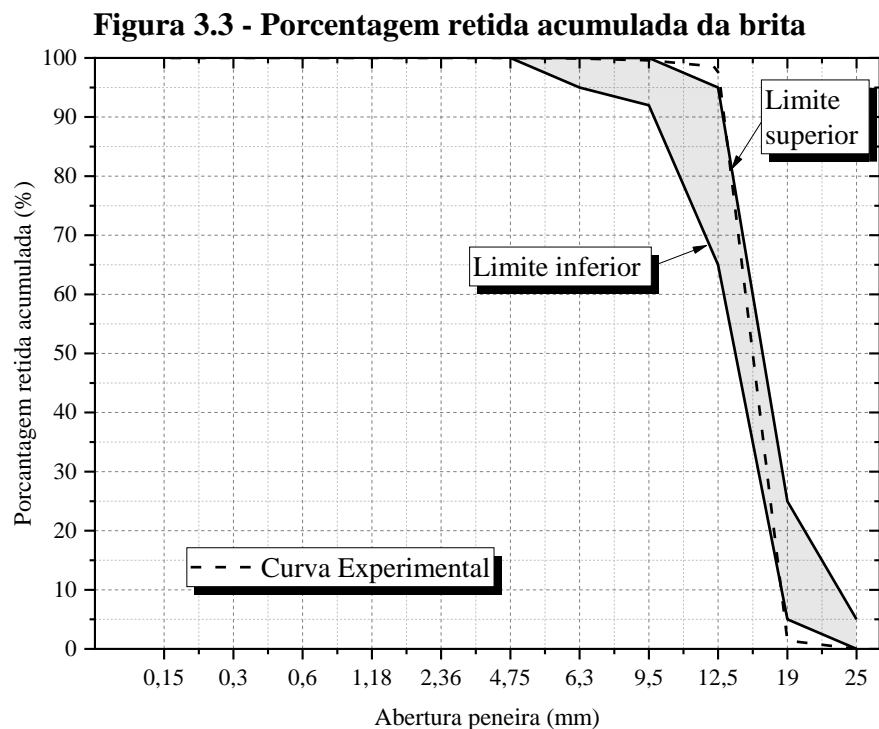
3.1.2 Caracterização do agregado graúdo

A brita é proveniente da região de Nova Londrina/PR, e sua composição granulométrica é apresentada na Tabela 3.3 e na Figura 3.3. Os resultados obtidos mostram que se trata de uma brita número 1, com dimensão máxima característica de 19 mm e massa específica de 2,82 kg/dm³.

Tabela 3.3 - Composição granulométrica da brita

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA							
PENEIRAS (mm)	ENSAIO 1			ENSAIO 2			MÉDIA DO MATERIAL RETIDO ACUMULADO (%)
	MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE MATERIAL		MASSA DE MATERIAL RETIDO (g)	PORCENTAGEM DE MATERIAL		
		RETIDO (%)	RETIDO ACUMULADO (%)		RETIDO (%)	RETIDO ACUMULADO (%)	
25,00	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19,00	163,5	6,6	6,6	118,3	4,8	4,8	5,7
12,70	2275,3	91,3	97,8	2344,0	94,2	99,0	98,4
9,50	30,2	1,2	99,0	18,6	0,7	99,7	99,4
6,30	21,7	0,9	99,9	6,1	0,2	100,0	99,9
4,75	2,0	0,1	100,0	0,6	0,0	100,0	100,0
2,36	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
1,18	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
0,60	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
0,30	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
0,15	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
FUNDOS	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	100,0	100,0
TOTAL	2492,7	gramas		2487,6	gramas		
DIMENSÃO MÁXIMA Ø Máx = 19,0 mm			MÓDULO DE FINURA MF = 7,05 mm			CLASSIFICAÇÃO DA BRITA BRITA 1	

Fonte: O autor (2020)



Fonte: O autor (2020)

3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado foi Cimento Portland (CP II-Z-32) com características informadas pelo fabricante conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Ensaaios físicos e químicos do cimento CII - Z – 32 produzidos pela Itambé Cimentos (Valores Médios)

DISCRIMINAÇÃO	UNID.	Meses / 2019		
		Janeiro	Fevereiro	Março
ENSAIOS FÍSICOS				
Massa específica	g/cm ³	2,92	2,92	2,92
Mat. Ret. # 200	%	1,76	2,47	2,08
Mat. Ret. # 325	%	7,71	9,57	9,01
Finura Blaine	cm ² /g	3.712	3.768	3.701
Água de consistência	%	28,2	28,1	27,4
Início de pega	min	253	258	245
Fim de pega	min	299	306	297
Expansibilidade a quente	mm	0,14	0,40	0,40
Resistencia à compressão				
Idade: 1 dia	MPa	14,8	14,1	13,5
Idade: 3 dias	MPa	27,7	27,5	25,7
Idade: 7 dias	MPa	33,5	33,4	30,9
Idade: 28 dias	MPa	41,1	41,2	40,5
ENSAIOS QUÍMICOS				
Perda ao fogo	%	6,97	7,06	7,18
Teor de ácido de Silício (SiO ₂)	%	20,66	21,03	20,43
Teor de óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	%	6,32	6,64	6,85
Teor de óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	%	3,23	3,27	3,25
Teor de óxido de cálcio total (CaO)	%	54,50	54,55	54,59
Teor de óxido de magnésio (MgO)	%	3,25	3,2	2,87
Teor de óxido de enxofre (SO ₃)	%	2,52	2,61	2,57
Resíduo Insolúvel	%	10,71	11,32	11,24

Fonte: Itambé Cimentos (2019)

3.2 COMPOSIÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS DE CONCRETO

Para a representatividade da pesquisa foram moldadas cinco distintas composições de concreto variando-se a relação água/cimento (a/c) e material seco com vistas à obtenção de resistências no intervalo de 20 a 50 MPa. Os traços são os indicados na Tabela 3.5 e foram obtidos através da metodologia de dosagem proposta por Assunção (2002). A referida metodologia por meio de ábacos, fornece equações para o cálculo das proporções de cada material para cada concreto.

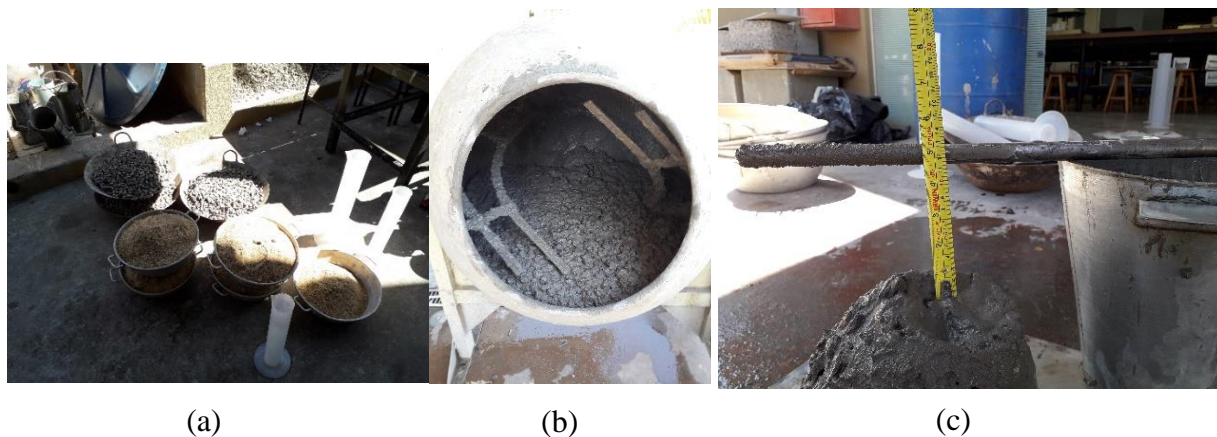
Tabela 3.5 - Traços dos concretos

Concreto	Cimento (CP II-Z-32) [kg]	Areia [kg]	Brita [kg]	a/c	Aditivo Plastificante %	Slump Test [mm]
C1	1	2,77	3,48	0,60	0	100 ± 20
C2	1	2,44	3,17	0,54	0	100 ± 20
C3	1	1,83	2,72	0,48	0	100 ± 20
C4	1	1,71	2,60	0,42	0,3	60 ± 10
C5	1	1,24	2,15	0,34	0,5	60 ± 10

Fonte: O autor (2020)

Os procedimentos de execução do concreto foram realizados conforme as prescrições normativas da ABNT NBR 5738 (2015), como é apresentado na Figura 3.4.

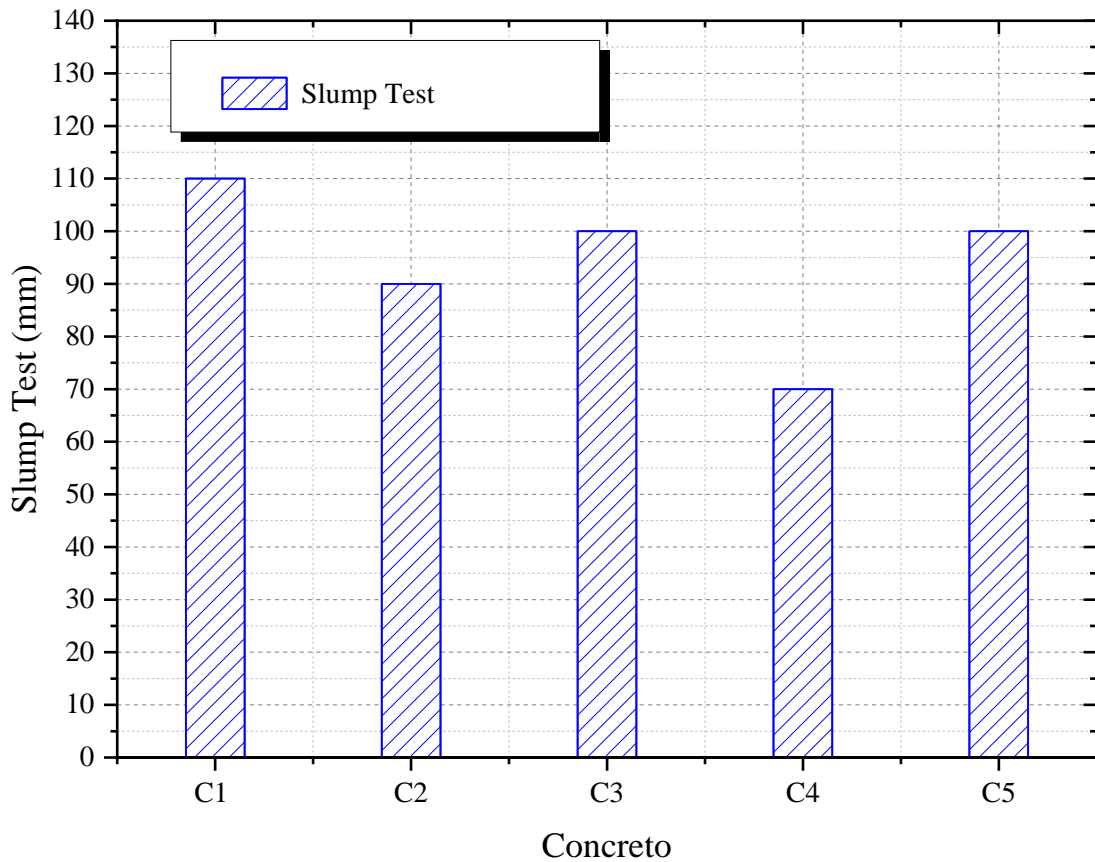
Figura 3.4 – a) Preparo dos materiais. b) Mistura do concreto. c) Ensaio de Slump Test.



Fonte: O autor (2020)

A Figura 3.5 apresenta os valores de Slump test para cada tipo de concreto. Nela é possível observar que todos os concretos apresentaram resultados entre 110 e 70 mm.

Figura 3.5 - Slump Test



Fonte: O autor (2020)

Após a moldagem, os CPs permaneceram no molde por 24h à temperatura ambiente e desmoldados e direcionados à câmara úmida do laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Estadual de Londrina, onde permaneceram até 48h antes da realização dos ensaios.

Buscando estudar o comportamento dos concretos aqui desenvolvidos, realizou-se as análises dos resultados sempre com o dobro da idade do ensaio anterior, conforme pesquisas desenvolvidas por outros autores, para a realização do programa experimental com tal premissa, foram adotadas as idades de 14, 28 e 56 dias para os ensaios de cada CP.

Para cada concreto foram moldados vinte e um corpos de prova cilíndricos (150x300 mm) realizando os ensaios em 7 CPs nas idades de, 14, 28 e 56 dias. A Tabela 3.6 mostra os mesmos 7 CPs utilizados em cada um dos ensaios, nas referidas idades para cada concreto.

- Ensaio de Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica ABNT NBR 8802 (2019);
- Ensaio de Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão ABNT NBR 7584 (2012);

- Ensaio de Ressonância Acústica, técnica de excitação por impulso norma E1876 (2015);
- Ensaio de Módulo de Elasticidade estático ABNT NBR 8522 (2017);
- Ensaio de Resistência à compressão ABNT NBR 5739 (2018).

Tabela 3.6 – Ensaio realizados e quantidade de corpos de prova utilizados

Concreto	Ensaio aos 14, 28 e 56 dias				
	VPU	IE	RA	E _c	f _c
C1	7	7	7	6 / 6 / 7	7
C2	7	7	7	6 / 6 / 7	7
C3	7	7	7	6 / 6 / 7	7
C4	7	7	7	6 / 7 / 7	7
C5	7	7	7	7 / 7 / 7	7

Fonte: O autor (2020)

As superfícies, superior e inferior, dos CPs foram retificadas mecanicamente utilizando-se, disco diamantado conforme prescrições da norma ABNT NBR 5738 (2015) Figura 3.6.

Figura 3.6 - Corpos de prova com superfícies regularizadas



Fonte: O autor (2020)

3.3 ENSAIO DE VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA (VPU)

O ensaio de VPU foi realizado nas idades de 14, 28 e 56 dias para, determinação das velocidades de propagação da onda ultrassônica conforme a ABNT NBR 8802 (2019).

Inicialmente, os transdutores do equipamento foram calibrados, por meio de barra de referência. Na superfície a ser ensaiada fez-se uso de vaselina para uma transmissão de onda ultrassônica mais eficiente entre os transdutores e o concreto.

A Figura 3.7 mostra-se o instrumento utilizado na pesquisa, trata-se do Ultrassom do tipo Pundit fabricado pela empresa Proceq, transdutores de 50 mm e 54 kHz de frequência. O ensaio foi realizado no laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Londrina UEL – PR.

Para obter uma maior precisão durante a realização do ensaio VPU, foi elaborado um suporte para evitar o movimento do CP durante a realização do procedimento, bem como permitir um melhor acoplamento dos transdutores. A Figura 3.7 mostra o suporte sendo utilizado durante a realização do ensaio VPU.

Figura 3.7 - Equipamento Ultrassom (Pundit) e realização do ensaio VPU



Fonte: O autor (2020)

3.4 ENSAIO DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA (RA)

O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM E1876 (2015) e ASTM C215 (2014), tendo-se como objetivo obter módulo elástico dinâmico longitudinal ($E_{d,l}$) do concreto a partir de frequências naturais de vibração, e a velocidade de propagação das ondas na direção longitudinal do CP.

Para a realização do ensaio foi utilizado o equipamento Sonelastic[®] Figura 3.8. É um equipamento fabricado pela empresa ATCP Engenharia Física.

Inicialmente, foram determinadas as dimensões e massa dos CPs que, foram posicionados no pórtico para ensaio. Foi aplicado um pequeno golpe nos CPs e, o som foi captado e em seguida processado pelo software do equipamento. O módulo foi então obtido a partir de frequências naturais de vibração. A Figura 3.9 (a) e (b), apresentam o posicionamento

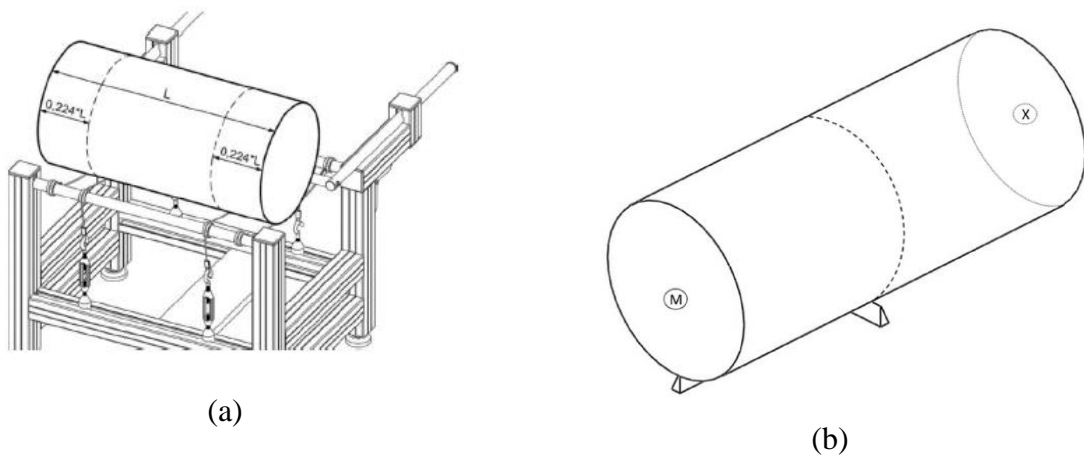
dos CPs para a realização do ensaio e o ponto de aplicação do impacto, para obtenção do módulo de Elasticidade dinâmico.

Figura 3.8 – Equipamento Sonelastic



Fonte: O autor (2020)

Figura 3.9 – Ensaio RA a) Posicionamento do corpo de prova. b) Ponto de aplicação do impacto



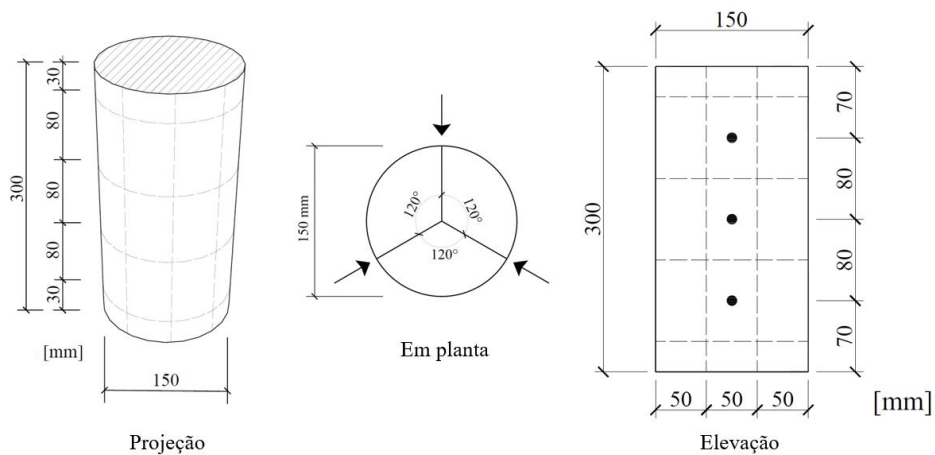
Fonte: Otani e Pereira (2017)

Na Figura 3.9 (a) observa-se o correto posicionamento do CP, indicando as medidas a serem respeitadas para a realização do ensaio. A Figura 3.9 (b), indica o ponto de aplicação do impacto para a obtenção do módulo de Elasticidade dinâmico a partir do modo de vibração longitudinal.

3.5 ENSAIO DE ESCLEROMETRIA (EI)

O procedimento de realização do ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7584 (2012) para, obter o índice esclerométrico de cada corpo de prova. Os CPs possuem seção (150x300) mm foram submetidos a 9 leituras nas idades de 14, 28 e 56 dias conforme mostrado na Figura 3.10 e 3.11.

Figura 3.10 - Posição dos pontos de ensaios nos CPs



Fonte: O autor (2020)

Figura 3.11 - Realização do Ensaio IE



Fonte: O autor (2020)

Para a realização do ensaio, o CP foi posicionado no prato da prensa através de uma compressão dada pela aplicação de uma força de 15% daquela prevista para a ruptura.

Foram aplicados 9 golpes medidos de maneira uniforme sendo 3 em cada geratriz escolhida, as geratrizes possuem ângulo de 120° entre si, conforme Figura 3.10.

Após realizada 9 medições calculou-se a média aritmética analisando-se a necessidade de desprezar valores individuais que se distanciam mais que 10% da média obtida. Sendo em dois CPs a média do IE, foi obtida com menos de cinco leituras individuais.

O cálculo do IE médio da área de ensaio foi obtido conforme a equação 3.1.

$$I_{E\alpha} = K \cdot I_E \quad (3.1)$$

Onde:

$I_{E\alpha}$ é o índice esclerométrico médio efetivo;

K é o coeficiente de correção do índice esclerométrico, no caso, esse valor foi igual a 1,00;

I_E é o índice esclerométrico médio.

O equipamento utilizado na pesquisa foi o Esclerômetro analógico de impacto Schmidt tipo N da Fortest, com energia de percussão de 2,25 N.m, conforme Figura 3.12, sendo os ensaios realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá UEM – PR.

Figura 3.12 – Esclerômetro analógico de impacto Schmidt



Fonte: O autor (2020)

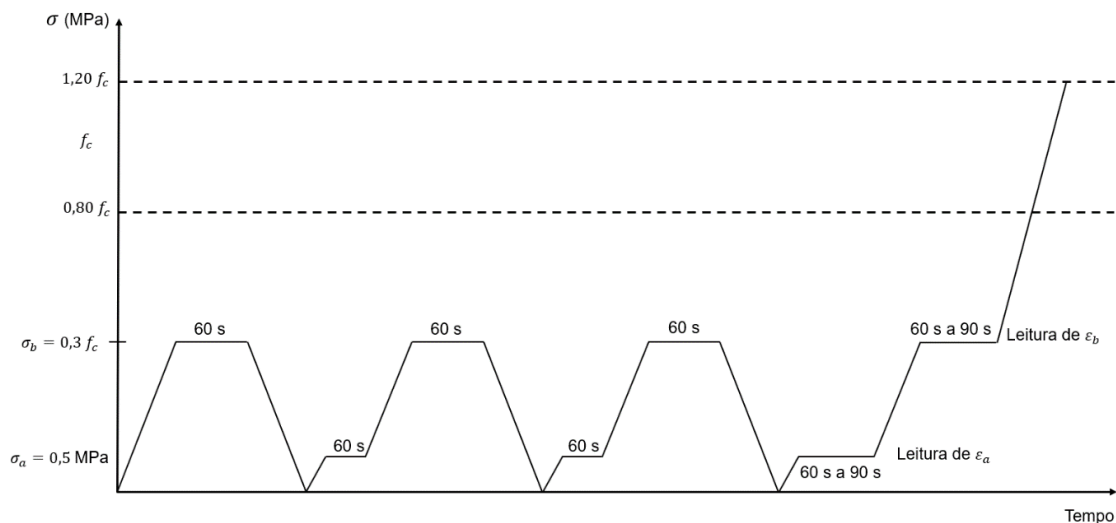
3.6 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE TANGENTE INICIAL (E_{ci})

O ensaio de Módulo de Elasticidade tangente inicial foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8522 (2017).

Com o CP centralizado nos pratos do equipamento da Prensa Instron EMIC 23-600 Figura 3.14 com capacidade 600 kN, controlada por computador, localizada no laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Maringá UEM – PR, aplicou-se ciclos de carga (carregamento e descarregamento), a velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s com a realização das leituras das deformações verticais.

A metodologia do ensaio foi realizada por meio de 4 etapas referentes aos ciclos de aplicação de cargas e leitura de deformações verticais, a partir de uma tensão de ruptura estimada para o CP. Após a conclusão dos ensaios de Módulo de Elasticidade tangente inicial, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial, sendo verificada se a tensão de ruptura estimada do CP estava em um intervalo de $\pm 20\%$ da tensão ruptura efetiva, caso os resultados não estivessem compreendidos neste intervalo, o valor obtido para o Módulo de Elasticidade deveria ser descartado. Sendo que em nenhum dos CPs a tensão de ruptura estimada para a realização do ensaio de Módulo de Elasticidade tangente inicial apresentou valores fora deste intervalo. A figura 3.13 apresenta a representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de Elasticidade.

Figura 3.13 - Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de Elasticidade estático



Fonte: ABNT NBR 8522 (2017)

Após a realização das medições de deformação de cada CPs a ABNT 8522 (2017) fornece equação para o cálculo do módulo de Elasticidade tangente inicial (E_{ci}) em GPa. A equação 3.2 apresenta o cálculo conforme a referida norma.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad (3.2)$$

Onde:

σ_b é a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão ou tensão especificada em projeto, expressa em MPa;

0,5 é o valor da tensão básica, expresso em MPa;

ε_b é a deformação específica do concreto sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica do concreto sob a tensão básica.

Figura 3.14 - Prensa Instron EMIC 23-600



Fonte: O autor (2020)

3.7 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

Após realizado o ensaio de Módulo de Elasticidade tangente inicial, realizou-se no mesmo CP o ensaio de resistência à compressão axial. Tal ensaio foi realizado no laboratório de Materiais da Universidade Estadual de Maringá UEM – PR de acordo com os procedimentos

recomendados pela ABNT NBR 5739 (2018) utilizando-se uma prensa hidráulica Universal EMIC MEU-100 com capacidade de carga de 1000 kN como mostrado na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Ensaio de Resistência à compressão axial



Fonte: O autor (2020)

A equação para o cálculo da resistência à compressão (f_c) em MPa, é conforme a equação 3.3.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad (3.3)$$

Onde:

f_c : é a resistência à compressão, em MPa;

F : é a força máxima alcançada, em Newtons;

D : é o diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do programa experimental que foi desenvolvido.

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE

4.1.1 Resistência à compressão

Na Tabela 4.1 apresentam-se os valores médios da resistência à compressão juntamente com o desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV) dos resultados.

Tabela 4.1 - Resistência à compressão axial dos CPs

Concreto	Resistência à compressão (MPa)								
	14 dias			28 dias			56 dias		
	$f_{c,14}$	σ	CV (%)	$f_{c,28}$	σ	CV (%)	$f_{c,56}$	σ	CV (%)
C1	23,11	1,16	5,02	26,00	0,70	2,67	29,20	2,16	7,40
C2	30,36	2,76	9,09	35,25	2,41	6,83	41,00	1,45	3,53
C3	30,60	2,88	9,41	35,07	2,62	7,46	41,94	1,08	2,56
C4	41,88	1,16	2,77	42,78	3,07	7,18	49,24	1,13	2,30
C5	46,40	2,16	4,65	47,72	1,21	2,53	51,06	4,57	8,95

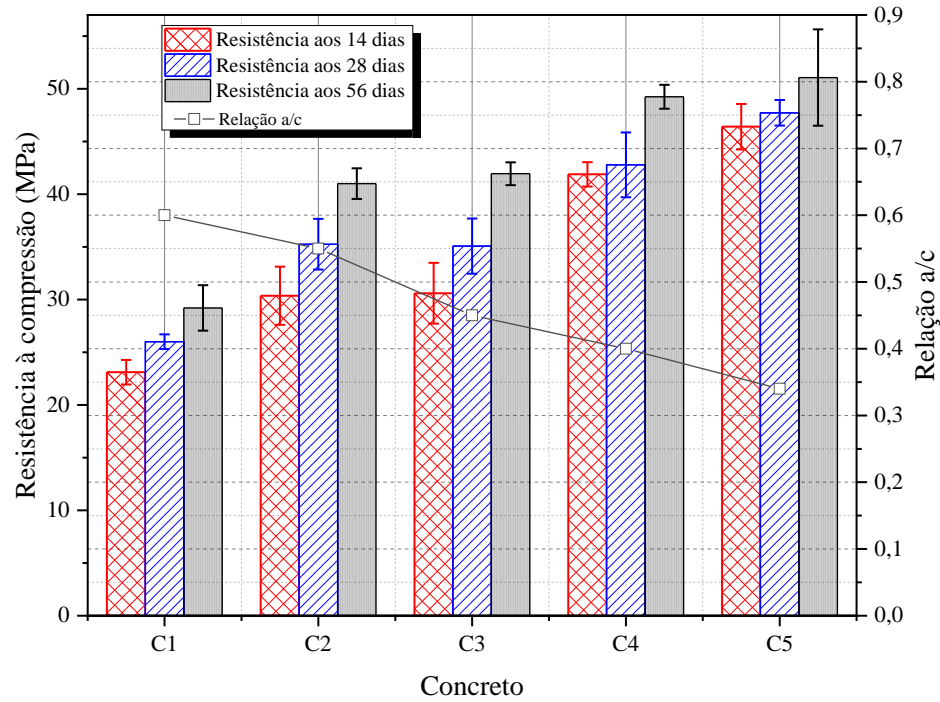
Fonte: O autor (2020)

O maior valor de resistência foi de 51,06 MPa para o concreto C5 na idade de 56 dias e o menor valor foi de 23,11 MPa para o concreto C1 aos 14 dias.

O maior valor de coeficiente de variação foi de 9,41 % para o concreto C3 na idade de 14 dias, denotando-se que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores de resistência à Compressão.

Na Figura 4.1 são comparados os resultados de resistência à compressão ao longo das idades. As barras verticais ao centro apresentam o desvio padrão obtido. É possível constatar em cada idade durante a realização dos ensaios. Na Figura verifica-se que todos os concretos apresentaram aumento gradativo nos valores de resistência com a evolução das idades. Uma pequena variação foi observada dentre os concretos 2 e 3.

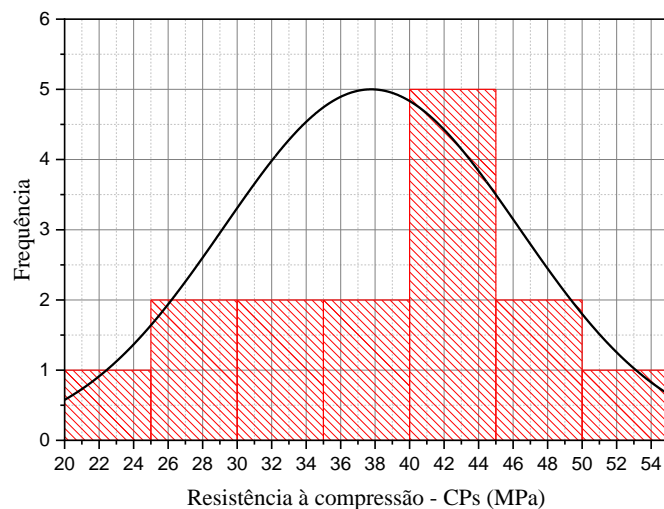
Figura 4.1- Evolução da resistência à compressão dos CPs ao longo da idade



Fonte: O autor (2020)

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%. Foi elaborado um histograma de distribuição e uma curva normal conforme apresentado na Figura 4.2. É possível afirmar, que os dados obtidos para resistência a compressão nas idades de 14, 28 e 56 são do tipo normais.

Figura 4.2 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio de Resistência à Compressão



Fonte: O autor (2020)

4.1.2 Relação do módulo de Elasticidade tangente inicial entre os corpos de prova

Na Tabela 4.2 apresentam-se os valores médios do módulo de Elasticidade estático, desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV) dos resultados.

Tabela 4.2 - Valores do ensaio de módulo de Elasticidade dos CPs

Concreto	Módulo de Elasticidade estático (GPa)								
	14 dias			28 dias			56 dias		
	$E_{c,14}$	σ	CV (%)	$E_{c,28}$	σ	CV (%)	$E_{c,56}$	σ	CV (%)
C1	33,40	1,18	3,53	35,95	2,40	6,68	38,05	1,32	3,47
C2	36,82	2,26	6,13	38,62	2,77	7,18	37,05	1,00	2,71
C3	36,68	2,19	5,97	39,99	2,40	6,01	41,29	1,00	2,43
C4	36,07	1,73	4,80	36,39	1,14	3,14	37,18	0,93	2,51
C5	35,57	2,40	6,74	36,76	2,67	7,26	37,95	1,32	3,49

Fonte: O autor (2020)

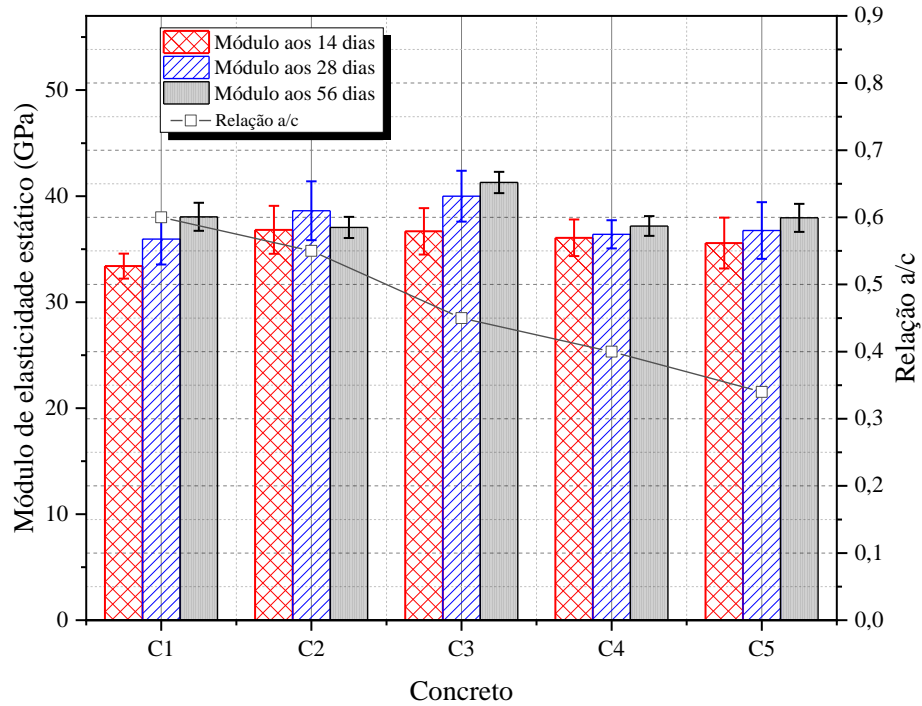
O maior valor de módulo foi aquele observado para o concreto C3 com idade de 56 dias (41,29 GPa) e o menor valor foi de 33,40 GPa para o concreto C1 aos 14 dias.

O maior valor de coeficiente de variação foi de 7,26 % para o concreto C5 na idade de 28 dias, denotando portanto, boa representatividade dos valores, pois, o desvio padrão não ultrapassou 10%.

Na Figura 4.3 são comparados os resultados do módulo de Elasticidade estático ao longo das idades para cada concreto. As barras ao centro apresentam o desvio padrão.

Na Figura é possível observar que todos os concretos apresentaram aumento nos valores de módulo entre as idades de 14 e 28 dias, sendo que os concretos C1, C3, C4 e C5 apresentaram um aumento nos valores de módulo ao longo das idades de 14, 28 e 56 dias. Apenas o concreto C2, apresentou queda no valor de módulo de Elasticidade na idade de 56 dias.

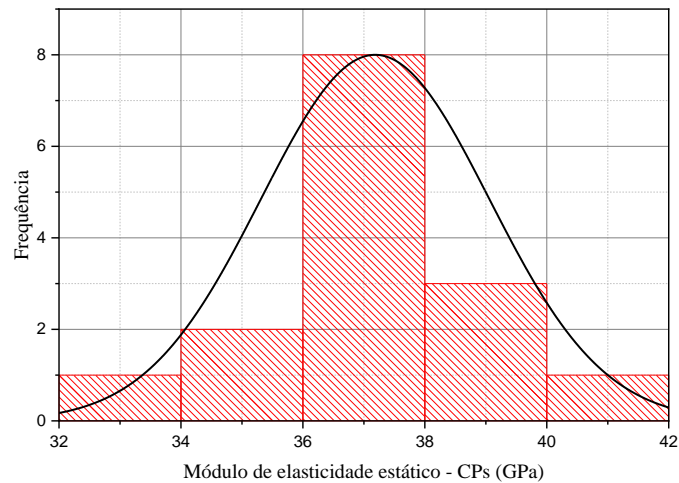
Figura 4.3 - Evolução do módulo de Elasticidade dos CPs ao longo da idade



Fonte: O autor (2020)

A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%. Para tanto elaborou-se um histograma de distribuição e uma curva normal conforme é apresentado na Figura 4.4. Fica constatado que os dados obtidos para o módulo de Elasticidade nas idades de 14, 28 e 56 são do tipo normais.

Figura 4.4 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio de módulo de Elasticidade



Fonte: O autor (2020)

4.2 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DE ONDA (VPU)

4.2.1 Relação da velocidade de propagação de onda entre os elementos analisados

A Tabela 4.3 apresenta os valores médios de VPU juntamente com o desvio padrão (σ) e coeficientes de variação (CV) dos resultados.

Tabela 4.3 - Valores do ensaio (VPU) dos CPs

Concreto	Velocidade de onda (m/s)								
	14 dias			28 dias			56 dias		
	V ₁₄	σ	CV (%)	V ₂₈	σ	CV (%)	V ₅₆	σ	CV (%)
C1	4562,18	19,38	0,42	4649,96	43,08	0,93	4762,50	40,86	0,86
C2	4729,43	46,78	0,99	4869,71	98,76	2,03	4910,85	34,96	0,71
C3	4765,46	39,51	0,83	4854,64	60,04	1,24	4971,71	25,98	0,52
C4	4801,61	22,54	0,47	4848,36	39,51	0,82	4870,61	48,49	1,00
C5	4802,75	54,11	1,13	4840,68	55,31	1,14	4887,61	44,9	0,92

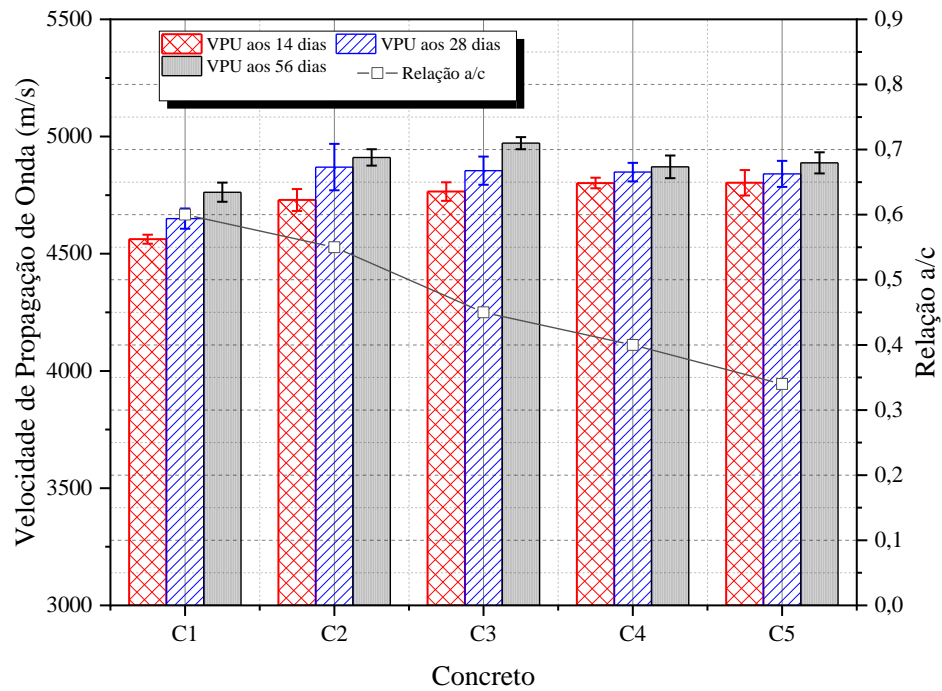
Fonte: O autor (2020)

O maior valor de VPU foi igual a 4971,71 m/s para o concreto C3 na idade de 56 dias. O menor valor obtido para o VPU foi de 4562,18 m/s para o concreto C1 aos 14 dias. O maior valor do CV foi de 2,03 % para o concreto C2 na idade de 28 dias, denotando que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassa 10%, garantindo boa representatividade dos valores.

Ressalta-se a dificuldade da reprodução das mesmas condições de pressão dos transdutores entre as leituras. Os valores obtidos revelam aumento da VPU com a evolução da idade em todos os concretos.

Na Figura 4.5 apresenta uma comparação entre os resultados de VPU. As barras verticais ao centro referem-se aos desvios padrões. É constatado que todos os concretos apresentaram aumento nos valores de VPU com as idades.

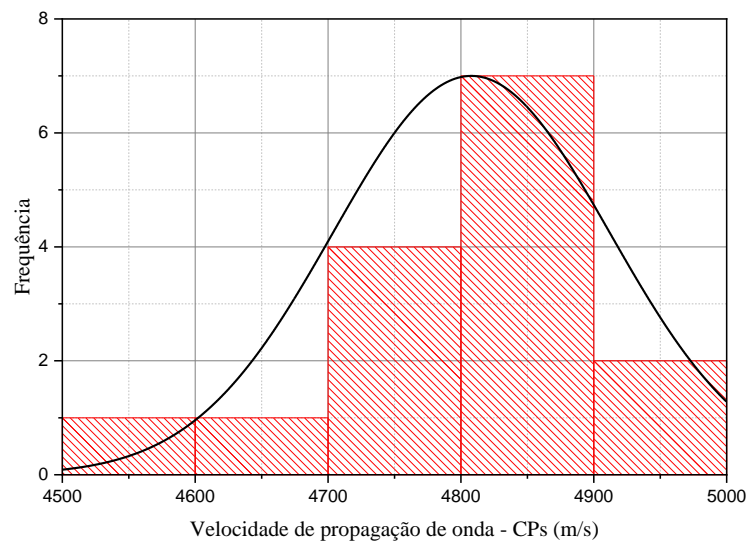
Figura 4.5 - Evolução da VPU nos CPs ao longo da idade



Fonte: O autor (2020)

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%. Foi elaborado um histograma de distribuição e uma curva normal conforme apresentado na Figura 4.6. É possível afirmar, que os dados obtidos para resistência a compressão nas idades de 14, 28 e 56 são do tipo normais.

Figura 4.6 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio VPU



Fonte: O autor (2020)

4.2.2 Curvas de correlação simples

A curva que melhor representa a correlação VPU x f_c e VPU x E_c , foi obtida por meio de análise das equações abaixo indicados, sendo adotado aquele de maior coeficiente de determinação (R^2).

- a) Linear: $y = a(VPU) + b$
- b) Potência: $y = a(VPU)^b$
- c) Exponencial: $y = ae^{b(VPU)}$
- d) Polinômio (2º grau): $y = a(VPU)^2 + b(VPU) + c$

4.2.2.1 VPU x f_c

A Tabela 4.4 apresenta os valores de R^2 para cada modelo de curva que correlaciona VPU com f_c .

Para a determinação das equações foram eliminados os valores de outliers dos dados obtidos por meio do programa experimental, uma vez que alguns dos resultados foram determinantes para diminuir o valor do coeficiente de determinação R^2 .

Tabela 4.4 - Coeficiente de determinação para cada equação VPU x f_c

Relação	Tipo de curva	Equação	R^2
VPU x f_c	Linear	$f_c = 0,05676(VPU) - 235,64534$	0,581
	Potência	$f_c = 5,96642 \times 10^{-26}(VPU)^{7,27619}$	0,559
	Exponencial	$f_c = 0,02607e^{0,00151(VPU)}$	0,555
	Polinômio (2º grau)	$f_c = -6,2846 \times 10^{-5}(VPU)^2 + 0,657(VPU) - 1667,978$	0,595

Fonte: O autor (2020)

A curva gerada a partir de uma equação polinomial (2º grau) foi a que apresentou maior coeficiente de determinação $R^2 = 0,595$ e dentre as equações testadas a equação exponencial foi que apresentou um valor mínimo de coeficiente de determinação $R^2 = 0,555$.

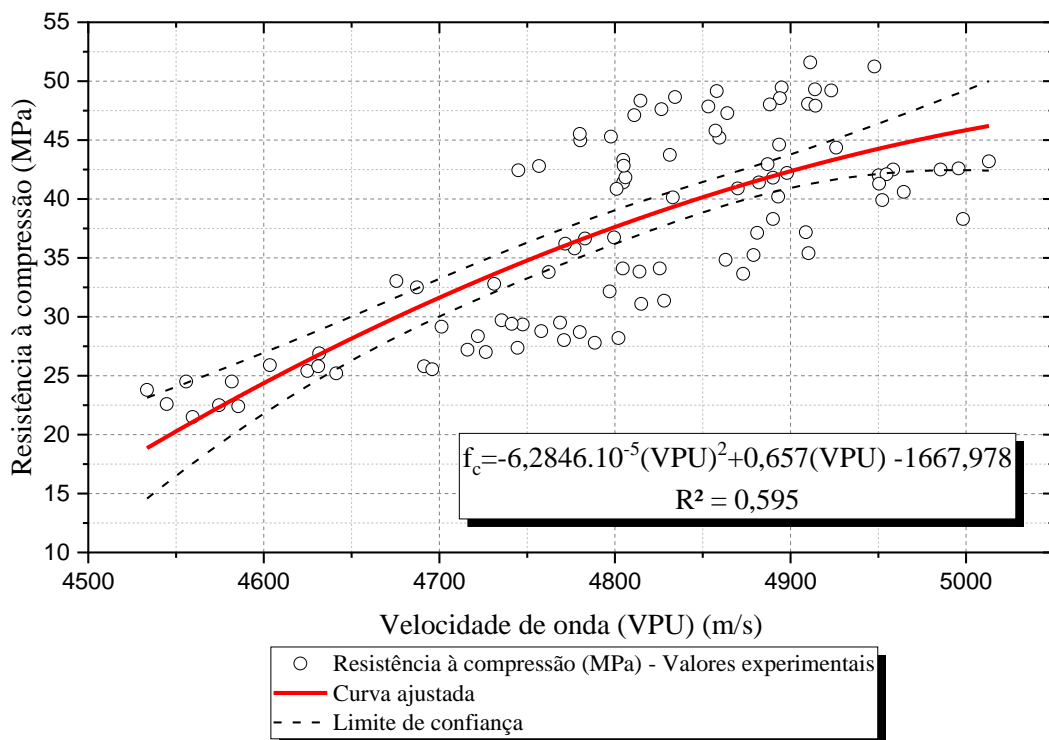
O valor de R^2 , aqui obtido, é apenas 2,6% maior do que aquele obtido por Vicentini e Ferrari (2020). Já Rashid e Waqas (2017) encontraram um valor de $R^2 = 0,79$, aproximadamente 25% acima do obtido na pesquisa.

A curva de correlação obtida é apresentada na Figura 4.7. Para o limite de confiança adotou-se um intervalo de confiança de 95%, este intervalo refere-se que existe 95% de chances a verdadeira curva de regressão.

A Figura 4.8 apresenta uma comparação entre os valores de resistência à compressão experimental com aqueles analíticos previstos pela equação polinomial (2º grau) de correlação. É possível verificar que a maioria dos dados está próxima da linha de igualdade $X = Y$. A razão média entre as resistências experimentais e analíticas foi de 1,023.

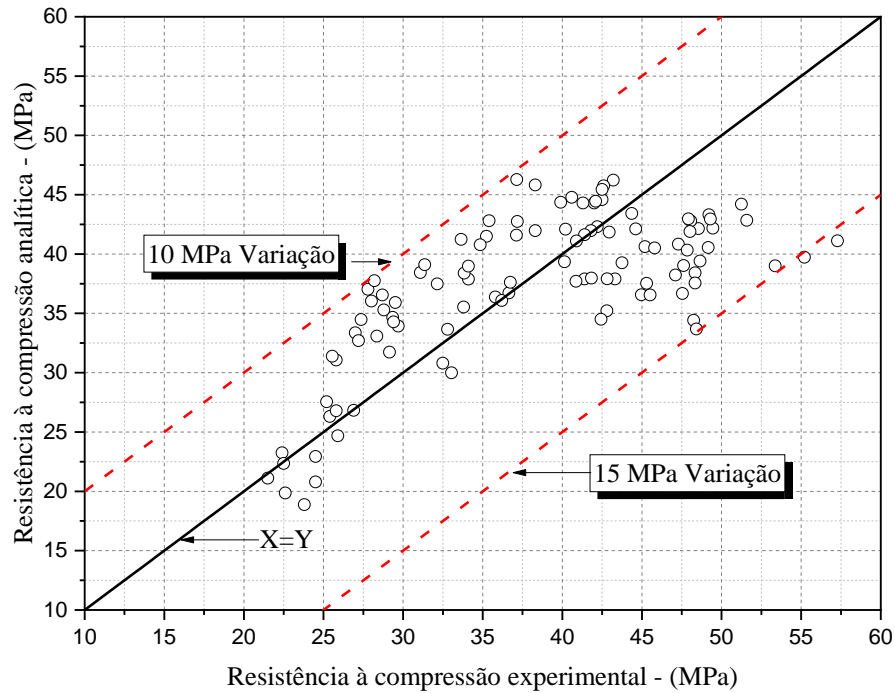
Os pontos que estão localizados abaixo da linha de igualdade apresentam resultados de resistência analíticos menores do que os valores experimentais. Então para concretos com resistência à compressão no intervalo de 30 a 40 MPa, os valores analíticos foram superestimados em uma variação de 10 MPa e acima de 40 MPa, percebeu-se uma subestimativa para os valores de resistência dentro de uma faixa de variação de 15 MPa. Importante também notar que abaixo de 30 MPa, os resultados previstos analiticamente são praticamente idênticos aos obtidos experimentalmente.

Figura 4.7 - Curva de correlação VPU x f_c



Fonte: O autor (2020)

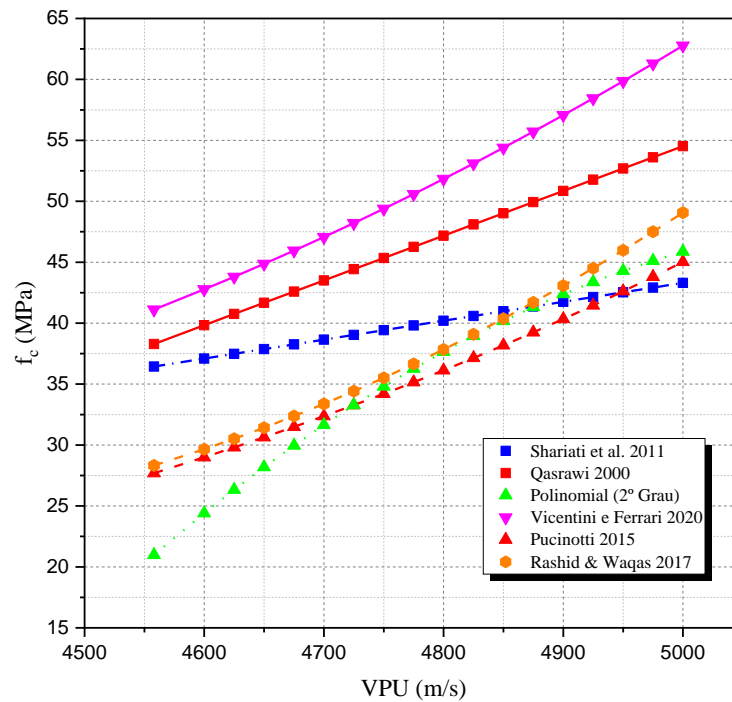
Figura 4.8 - Valores experimentais x valores analíticos para f_c a partir do ensaio VPU



Fonte: O autor (2020)

Na Figura 4.9 são apresentadas curvas propostas por outros autores para efeito de comparação com as curvas obtidas no presente trabalho.

Figura 4.9 - Comparação com curvas VPU x f_c obtidas por outros autores



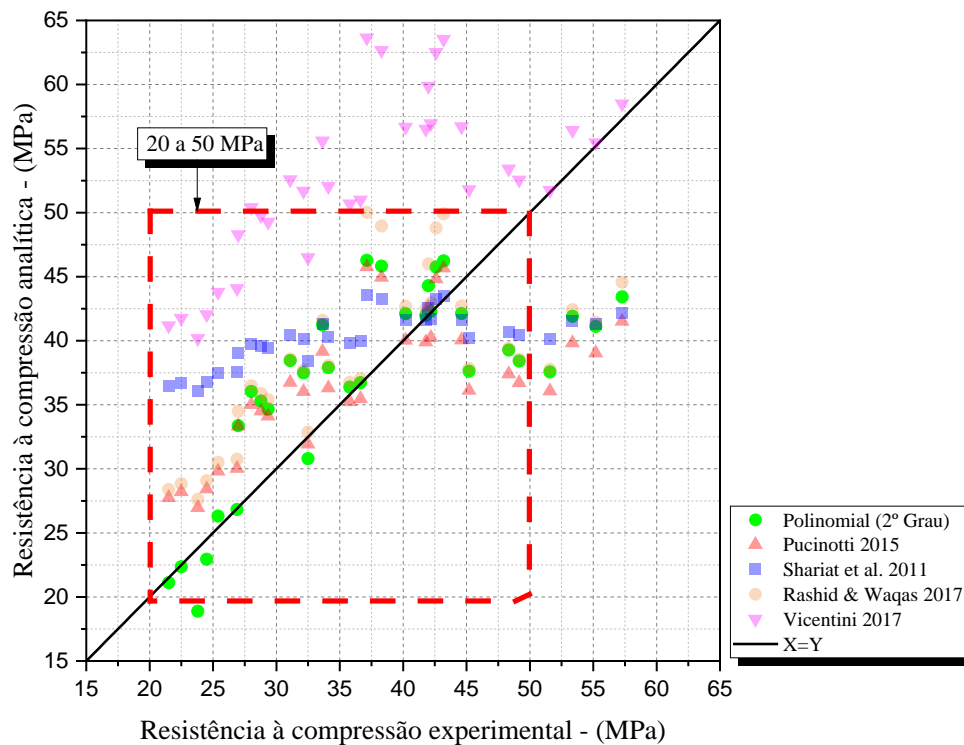
Fonte: O autor (2020)

Conforme apresentado na Figura 4.9 pode ser observado que as equações propostas por outros autores diferem muito entre si, o que demonstra a importância e a necessidade do desenvolvimento curvas correlacionadas com o concreto que se deseja inspecionar.

Através da Figura 4.9 constata-se que as curvas propostas por Rashid e Waqas (2017) que apresenta $R^2=0,79$, Pucinotti (2015) com $R^2=0,82$, Qasrawi (2000) $R^2=0,91$, Vicentini (2020) $R^2=0,58$ e Shariati et al. (2011) com $R^2=0,91$, foram as que mais se adequaram a curva de polinomial (2º grau) proposta no presente trabalho.

A Figura 4.10 apresenta a relação dos valores de resistência obtidos experimentalmente e os valores analíticos conforme expressões fornecidas pelos autores dos trabalhos que mais se aproximaram das equações propostas neste trabalho.

Figura 4.10 – Comparativo dos valores experimentais com analíticos da resistência com outros autores



Fonte: O autor (2020)

É observado que as equações propostas por Pucinotti (2015), Rashid e Waqas (2017) e Shariat et al. (2011) apresentam valores muito próximos ao proposto pelas equações, polinomial (2º grau) dentro do intervalo de resistência compreendido de 20 a 50 MPa. Para resistências abaixo de 40 MPa as curvas propostas pelos referidos autores apresentam valores analíticos maiores do que os valores experimentais e para valores acima de 40 MPa as resistências analíticas são menores do que as experimentais.

A curva de correlação obtida na presente pesquisa é válida para o intervalo de resistência e velocidade de onda ultrassônica indicada na Tabela 4.5. O intervalo de resistência foi considerado a partir da curva ajustada que apresentou maior coeficiente de determinação com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.5 - Intervalo de referência dos valores envolvidos

Elemento	f _c (MPa)		VPU (m/s)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
CP (150 x 300)	18,80	46,20	4533,50	5013,00

Fonte: O autor (2020)

4.2.2.2 VPU x E_c

A Tabela 4.6 apresenta os valores de R² para cada modelo de curva que correlaciona VPU com E_c.

Para a determinação das equações foram eliminados os valores de outliers dos dados obtidos por meio do programa experimental, uma vez que alguns dos resultados foram determinantes para diminuir o valor do coeficiente de determinação R².

Tabela 4.6 - Coeficiente de determinação para cada equação VPU x E_c

Relação	Tipo de curva	Equação	R ²
VPU x E _c	Linear	$E_c = 0,01117(VPU) - 16,63$	0,249
	Potência	$E_c = 1,7117 \times 10^{-4}(VPU)^{1,449}$	0,249
	Exponencial	$E_c = e^{(-2,14367+0,0021(VPU)-1,87 \times 10^{-7}(VPU^2))}$	0,251
	Polinômio (2º grau)	$E_c = -6,145386 \times 10^{-6}(VPU)^2 + 0,06996(VPU) - 157,67$	0,251

Fonte: O autor (2020)

As curvas do tipo polinomial (2º grau) foi a que apresentou maior coeficiente de determinação R² = 0,251 denotando baixa correlação entre o ensaio VPU e E_c, para os valores experimentais aqui encontrados.

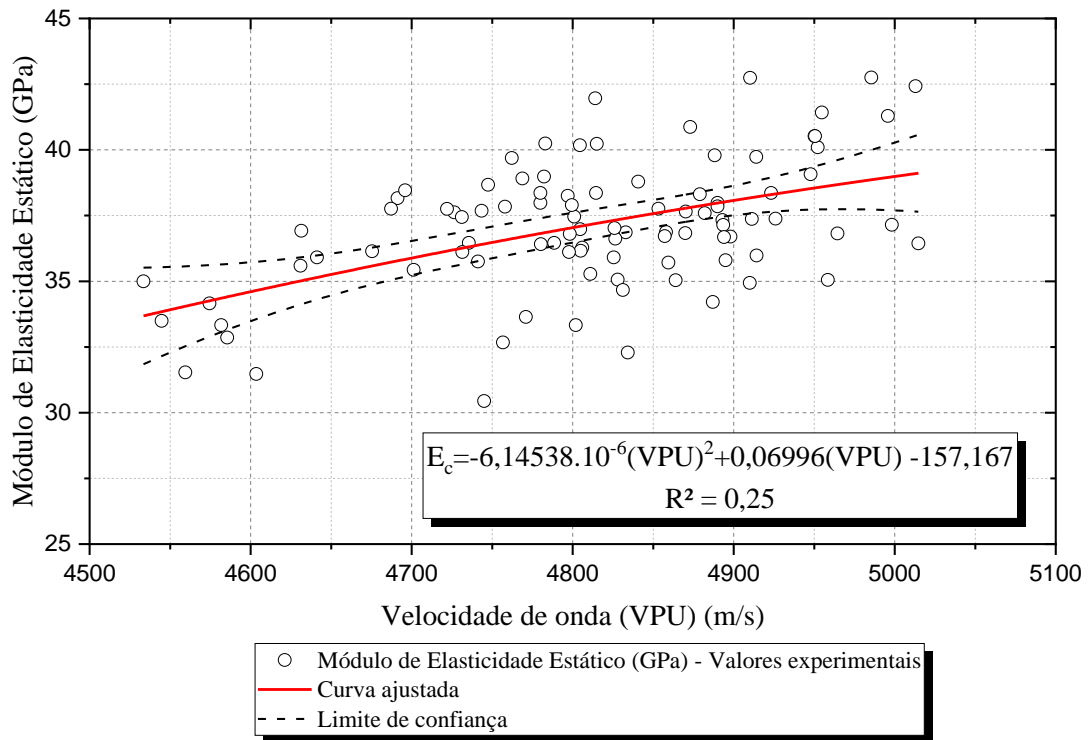
A curva de correlação obtida é apresentada na Figura 4.11. Para o limite de confiança adotou-se um intervalo de confiança de 95%, este intervalo refere-se que existe 95% de chances a verdadeira curva de regressão.

A Figura 4.12 apresenta uma comparação entre os valores de módulo de Elasticidade experimental com aqueles analíticos previstos pela equação polinomial (2º grau) de correlação.

É possível verificar que a maioria dos dados está próxima da linha de igualdade $X = Y$. A razão média entre os valores experimentais e analíticas foi de 1,013.

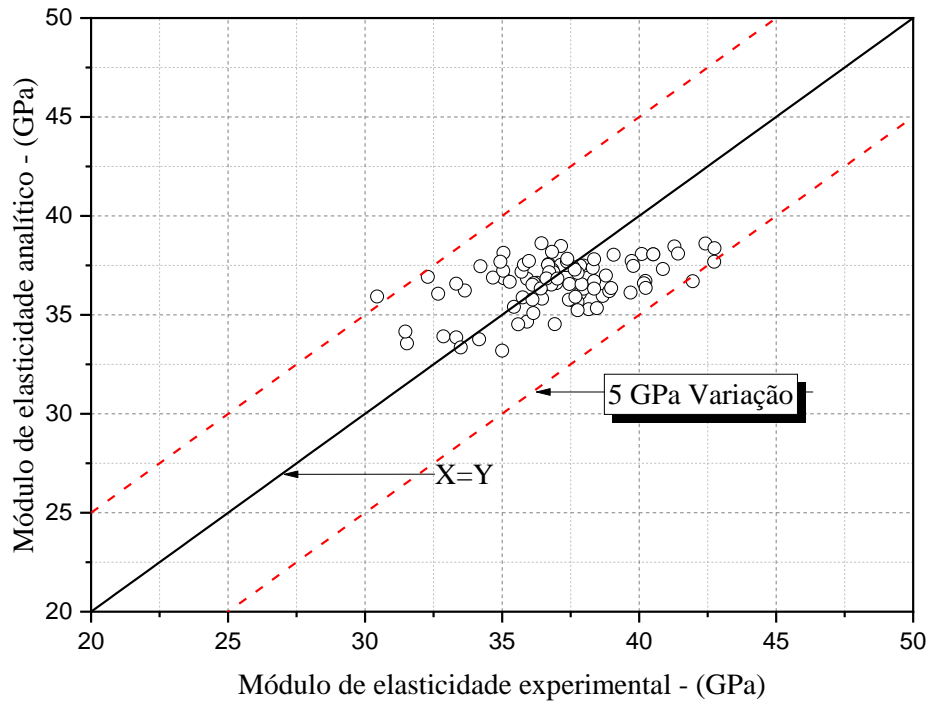
Os pontos que estão localizados abaixo da linha de igualdade apresentam resultados de módulo de Elasticidade analíticos menores do que os valores experimentais. Então para concretos com módulo de Elasticidade estático no intervalo de 30 a 40 GPa, os valores analíticos apresentaram uma variação onde os valores subestimados e superestimados dentro de uma faixa de variação de 5 GPa. Importante também notar que, os resultados previstos analiticamente são praticamente idênticos aos obtidos experimentalmente.

Figura 4.11-Curva de correlação VPU x E_c



Fonte: O autor (2020)

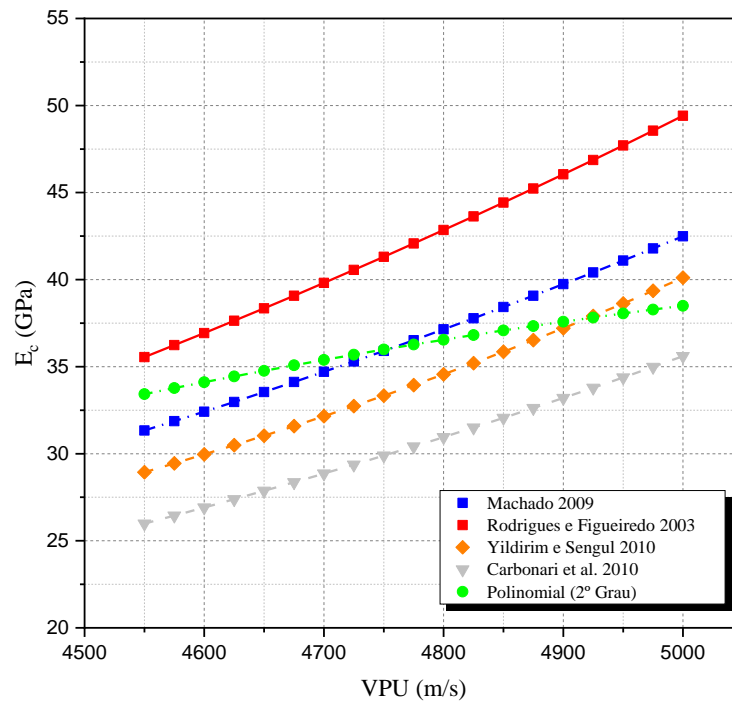
Figura 4.12 - Valores experimentais x valores analíticos para E_c a partir do ensaio VPU



Fonte: O autor (2020)

Na Figura 4.13 são apresentadas curvas propostas por outros autores para efeito de comparação com as curvas obtidas no presente trabalho.

Figura 4.13 - Comparação com curvas VPU x E_c obtidas por outros autores



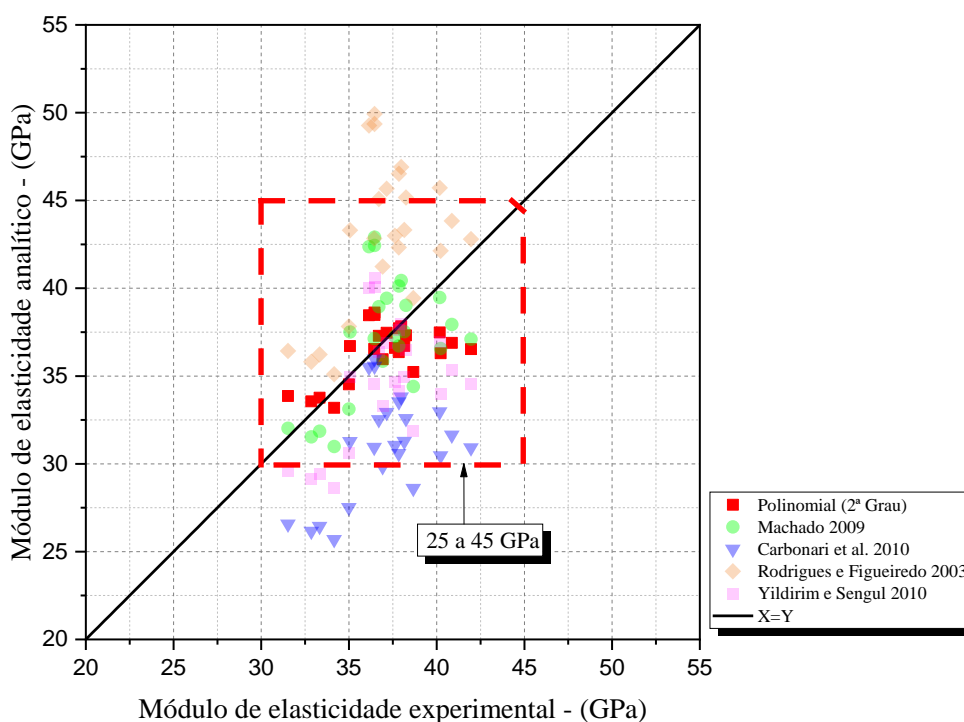
Fonte: O autor (2020)

Conforme apresentado na Figura 4.13 pode ser observado que as equações propostas por outros autores diferem muito entre si, reforçando a importância e a necessidade do desenvolvimento de curvas correlacionadas com o concreto que se deseja inspecionar.

Através da Figura 4.13 constata-se que as curvas propostas por Machado (2009) que apresenta $R^2=0,81$, Yildirim e Sengul (2010) com $R^2=0,98$, foram as que mais se adequaram a curva polinomial (2º Grau) proposta no presente trabalho, além das curvas propostas por Toralles et al (2010) e Rodrigues e Figueiredo (2003).

A Figura 4.14 apresenta a relação dos valores de resistência obtidos experimentalmente e os valores analíticos conforme expressões fornecidas pelos autores dos trabalhos que mais se aproximaram das equações propostas neste trabalho.

Figura 4.14 - Comparativo dos valores experimentais com analíticos do módulo com outros autores



Fonte: O autor (2020)

É observado que a equação proposta por Machado (2009), apresentou valores muito próximos ao proposto pela equação polinomial (2º Grau) dentro do intervalo de módulo de elasticidade compreendido de 30 a 45 GPa. Para módulos abaixo de 35 GPa a curva proposta por Machado (2009) apresenta valor menor do que os valores experimentais e para valores acima de 35 GPa os módulos analíticos são maiores do que as experimentais.

A curva de correlação obtida na presente pesquisa é válida para o intervalo de módulo e velocidade de onda ultrassônica indicada na Tabela 4.7. O intervalo foi considerado a partir da curva ajustada que apresentou maior coeficiente de determinação com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.7 - Intervalo de referência dos valores envolvidos

Elemento	E _c (GPa)		VPU (m/s)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
CP (150 x 300)	33,68	39,11	5014,75	4533,50

Fonte: O autor (2020)

4.3 ENSAIO DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA

4.3.1 Relação do módulo de Elasticidade dinâmico obtido nos elementos analisados

Na Tabela 4.8 apresentam-se os valores médios do módulo de Elasticidade dinâmicos (E_d), desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CV) dos resultados.

Tabela 4.8 - Valores do ensaio de módulo de Elasticidade dinâmico dos CPs

Concreto	Módulo de Elasticidade dinâmico (GPa)								
	14 dias			28 dias			56 dias		
	E _{d,14}	σ	CV (%)	E _{d,28}	σ	CV (%)	E _{d,56}	σ	CV (%)
C1	40,53	0,77	1,91	41,77	0,53	1,26	43,02	0,51	1,18
C2	43,18	0,48	1,10	44,85	0,36	0,80	45,13	0,66	1,47
C3	44,00	0,53	1,21	45,37	0,59	1,30	46,67	0,84	1,80
C4	44,62	0,59	1,33	45,03	0,35	0,78	46,24	0,55	1,19
C5	45,00	0,55	1,19	45,46	0,55	1,20	47,08	0,77	1,69

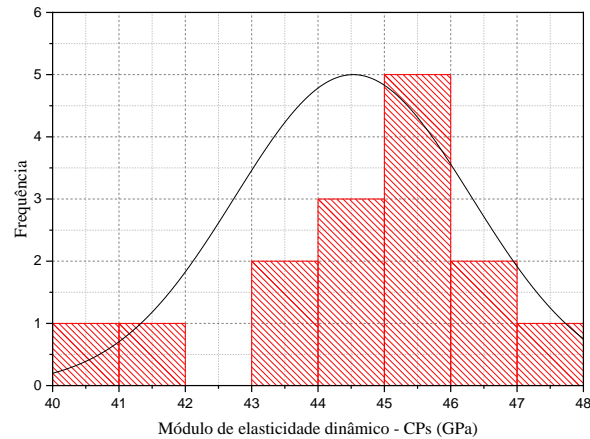
Fonte: O autor (2020)

O maior valor de módulo dinâmico foi aquele observado para o concreto C5 com idade de 56 dias 47,08 GPa e o menor valor foi de 40,53 GPa para o concreto C1 aos 14 dias.

O maior valor de coeficiente de variação foi de 1,33 % para o concreto C4 na idade de 14 dias, denotando, boa representatividade dos valores, pois o desvio padrão não ultrapassou 10%.

A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%. Para tanto elaborou-se um histograma de distribuição e uma curva normal conforme é apresentado na Figura 4.15. Fica constatado que os dados obtidos para o módulo de Elasticidade dinâmico nas idades de 14, 28 e 56 são do tipo normais.

Figura 4.15 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio RA

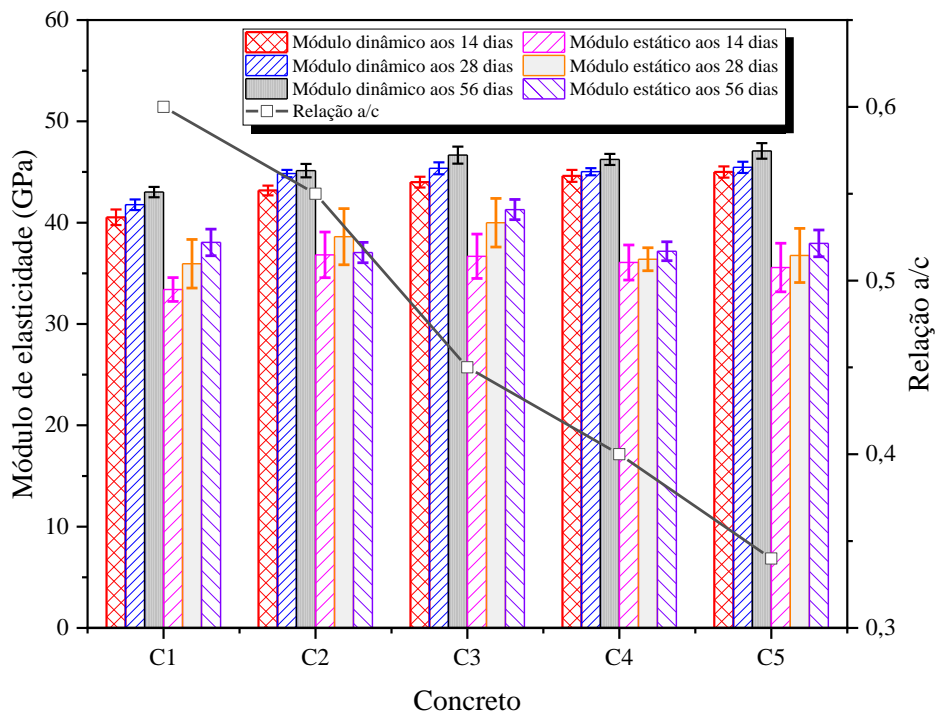


Fonte: O autor (2020)

Na Figura 4.16 são apresentados os resultados dos módulos de Elasticidade dinâmico e estático ao longo das idades para cada concreto. As barras ao centro apresentam o desvio padrão. Na Figura é possível verificar que todos os concretos apresentaram aumento gradativo nos valores de módulo dinâmico e estático com a evolução das idades.

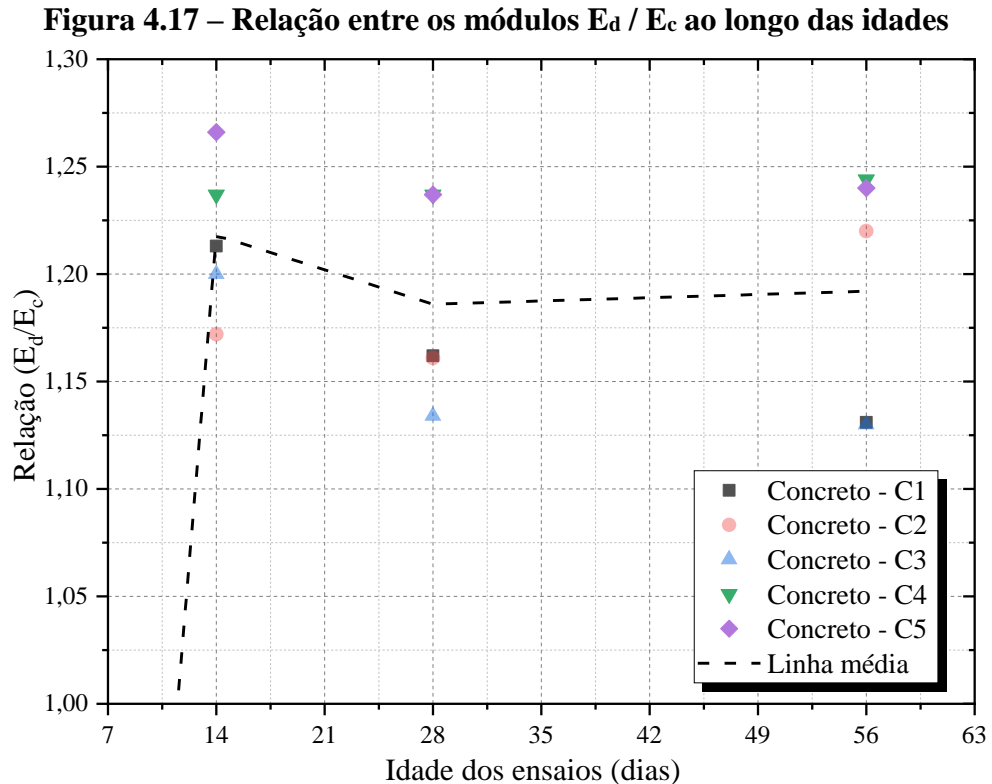
Ainda da Figura 4.16 constata-se a influência da relação a/c nos valores do módulo de Elasticidade dinâmico, em que, maior a a/c menor é o valor do módulo E_d .

Figura 4.16 - Evolução dos módulos de Elasticidade dinâmico e estático dos CPs ao longo da idade



Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.17 apresenta a relação entre os módulos E_d/E_c para cada concreto com as idades. A linha tracejada corresponde à relação média obtida na data dos ensaios, em que é possível verificar que a relação (E_d/E_c) é constante ficou no intervalo entre 1,10 e 1,30. Essa constatação é a mesma, apresentada nas pesquisas realizadas por Neville (1997). Logo, para os concretos aqui analisados, observou-se que o valor do módulo de Elasticidade estático equivale a 80% - 90% do valor obtido por meio do ensaio não-destrutivo.



Fonte: O autor (2020)

Na Tabela 4.9 é apresentada a relação entre os módulos dinâmicos e estáticos (E_d/E_c) para cada idade. A relação mínima $E_d/E_c = 1,13$ foi obtida nos concretos C1 e C3 nas idades de 28 e 56 dias, já os concretos C4 e C5 apresentaram os maiores valores de $E_d/E_c = 1,27$ este valor apresenta mesma ordem de grandeza obtida por outros pesquisadores. Sendo o valor aqui obtido apenas 7,4% maior do que o valor obtido por Diogenes et al (2011) para concretos que apresentaram resistências semelhantes ao da pesquisa.

Tabela 4.9 - Relação entre os módulos de Elasticidade dinâmico e estático (E_d/E_c)

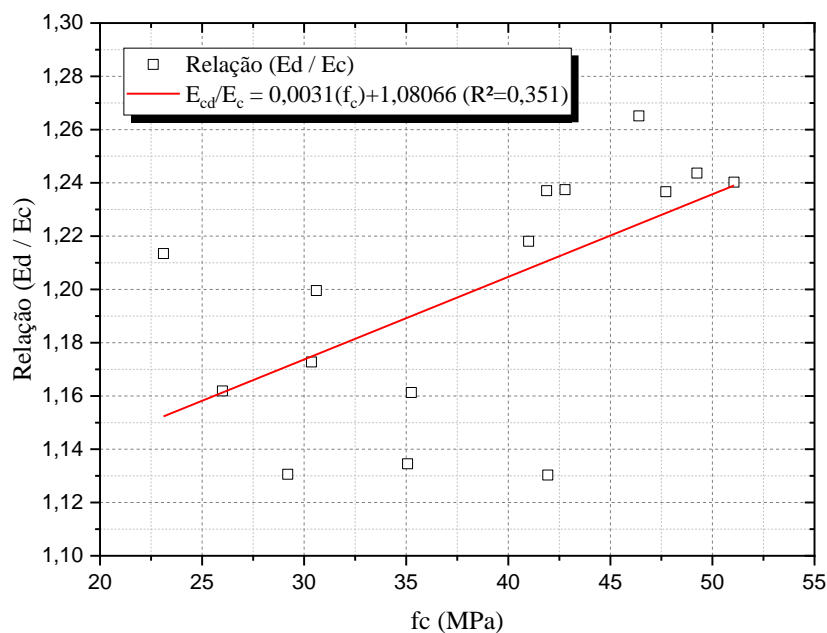
Concreto	$E_{d,14}/ E_{c,14}$	$E_{d,28}/ E_{c,28}$	$E_{d,56}/ E_{c,56}$
C1	1,21	1,16	1,13
C2	1,17	1,16	1,22
C3	1,20	1,13	1,13
C4	1,24	1,24	1,24
C5	1,27	1,24	1,24

Fonte: O autor (2020)

Segundo Malhotra e Sivasundaram (2004), a resistência à compressão interfere no diretamente nos valores de módulo de elasticidade. Na Figura 4.18 é apresentada a influência da resistência à compressão sobre a relação (E_d/E_c). Através da Figura verifica-se que a relação (E_d/E_c) aumenta de acordo com o aumento da resistência à compressão do concreto. Para menores resistências, observa-se menor diferença entre os valores de módulos e, para maiores resistências, a diferença aumenta. Assim, a estimativa do módulo de elasticidade do concreto a partir do ensaio não-destrutivo deve considerar esse efeito de forma a minimizar o erro.

Para os concretos aqui analisados e com base nos resultados obtidos, a recomendação para a estimativa do módulo estático a partir do módulo dinâmico é a que segue:

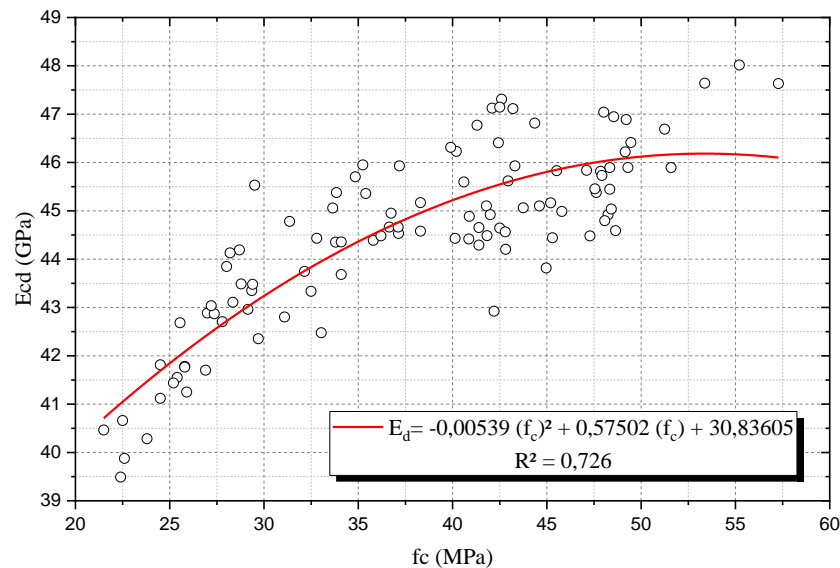
- A) Para concretos até 30 MPa: $E_c = 0,845E_d$
- B) Para concretos entre 30 e 40 MPa: $E_c = 0,868E_d$
- C) Para concretos entre 40 e 50 MPa: $E_c = 0,814E_d$

Figura 4.18 – Relação entre a resistência à compressão e a relação (E_d/E_c) dos CPs

Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.19 apresenta a relação entre a resistência à compressão (f_c) e módulo de elasticidade dinâmico (E_d) de onde, verifica-se a existência de forte correlação entre os dois parâmetros ($R^2=0,726$). A análise permite comprovar que o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) está diretamente relacionado com a resistência do concreto e, no caso, o aumento da resistência, conduz a um aumento do módulo.

Figura 4.19 – Relação entre a resistência à compressão e o E_d



Fonte: O autor (2020)

4.3.2 Análise da correlação entre E_d e E_c

A Tabela 4.10 apresenta o estudo de correlação entre os módulos dinâmico (E_{cd}) e estático (E_c). Para escolha da melhor equação de correlação fez-se uso do maior coeficiente de determinação R^2 .

Tabela 4.10 - Coeficiente de determinação para cada equação E_{cd} x E_c

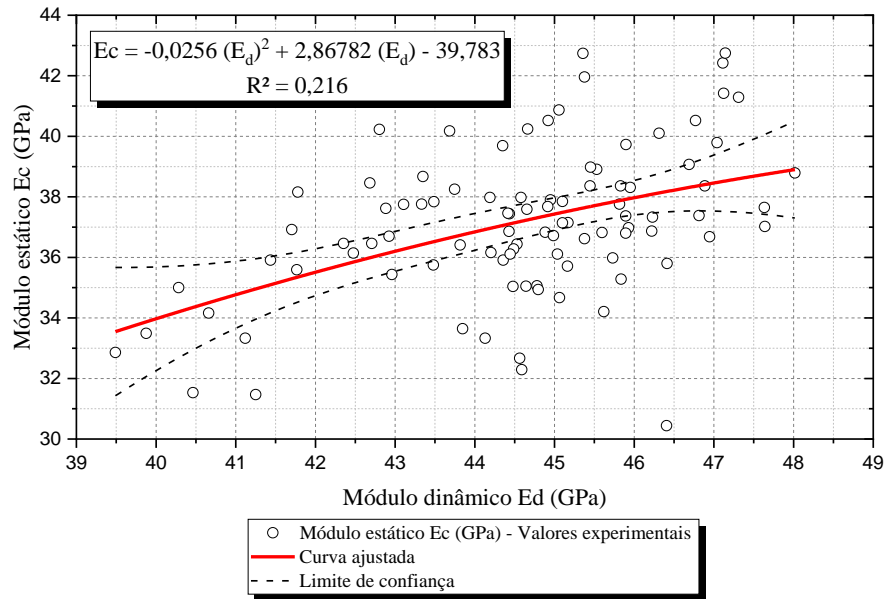
Relação	Tipo de curva	Equação	R^2
E_d x E_c	Linear	$E_c = 0,617(E_d) + 9,61$	0,214
	Potência	$E_c = 2,25899(E_d)^{0,7371}$	0,215
	Exponencial	$E_c = e^{(-7,486 \times 10^{-4}(E_d)^2 + 0,08251(E_d) + 1,42156)}$	0,216
	Polinômio (2º grau)	$E_c = -0,0256(E_d)^2 + 2,867(E_d) - 39,782$	0,216

Fonte: O autor (2020)

A curva elaborada através de uma equação polinomial de 2º grau foi a que apresentou maior coeficiente de determinação $R^2 = 0,216$ e denotando baixa correlação entre o módulo

estático e dinâmico, esta condição está relacionada à fatores como mistura, tipo de cimento, trabalhabilidade e cura, bem como outros fatores que impactam no módulo estático e dinâmico (GIDRÃO, 2015). A curva de correlação obtida é apresentada na Figura 4.20. Para o limite de confiança adotou-se um intervalo de confiança de 95%, este intervalo refere-se que existe 95% de chances a verdadeira curva de regressão.

Figura 4.20 - Curva de correlação E_d x E_c

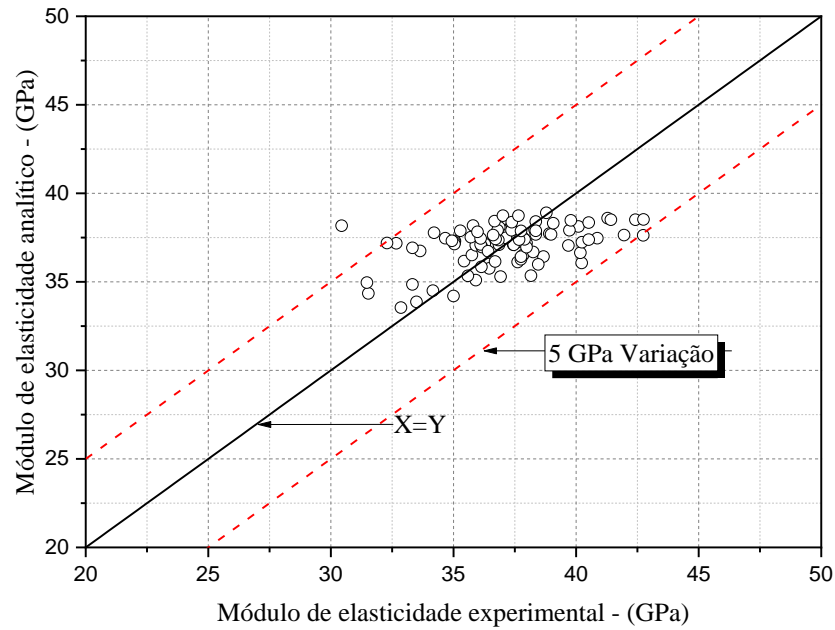


Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.21 apresenta a comparação entre os valores de módulo de Elasticidade obtidos experimentalmente com aqueles previsto analiticamente por meio da equação polinomial de correlação. É possível verificar que a maioria dos dados está próxima da linha de igualdade $X = Y$. A relação obtida demonstra que os valores estimados são muito próximos dos obtidos experimentalmente.

Os pontos localizados abaixo da linha de igualdade apresentam resultados de módulo de Elasticidade analíticos menores do que os valores experimentais, logo verifica-se que acima de 38 GPa os resultados analíticos obtidos para o módulo estático foram inferiores aos valores experimentais. Os valores analíticos obtidos apresentaram uma variação para, sub-estimativa e super-estimada do módulo de Elasticidade dentro de um intervalo de 5,0 GPa.

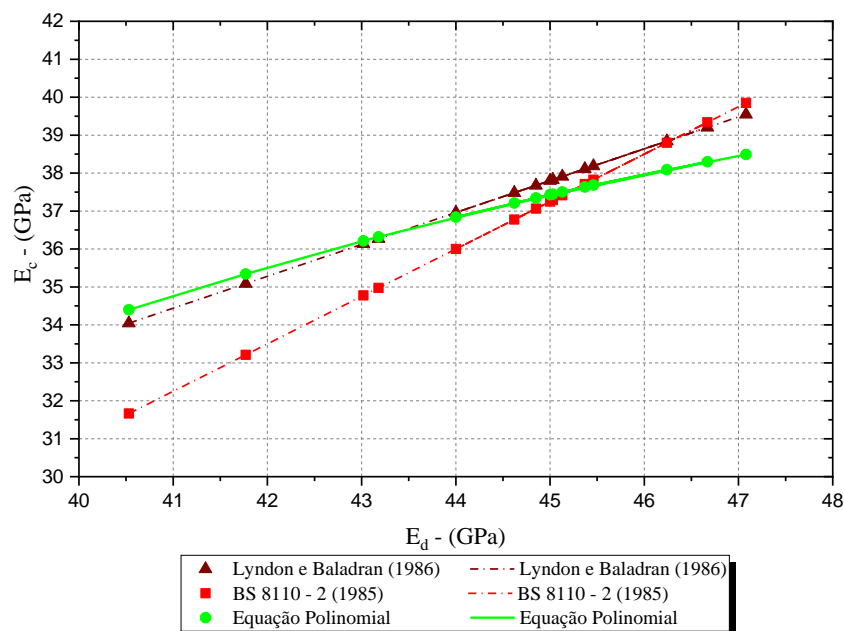
Figura 4.21 - Comparativo dos valores experimentais com analíticos do módulo dinâmico



Fonte: O autor (2020)

Foi realizada uma comparação entre os valores analíticos encontrados obtidos a partir da equação polinomial com resultados analíticos de equações propostas por outros autores. Dentre eles o código britânico BS 8110 – 2 (1985) e a equação proposta por Lyndon e Baladran (1986). Na Figura 4.22 são apresentadas as curvas propostas pelas equações das referências citadas, para efeito de comparação com as curvas obtidas no presente trabalho.

Figura 4.22 - Comparação com curvas E_d x E_c obtidas por outros autores



Fonte: O autor (2020)

Da Figura 4.22 pode ser observado que as equações propostas pelas referências citadas pouco diferem da equação polinomial e apresentam, inclusive, uma mesma tendência. Os resultados obtidos pela equação de Lyndon e Baladran (1986) são os mais próximos daqueles obtidos pela equação polinomial, sendo que as diferenças nos resultados somente acentuam-se para valores acima de 45 GPa. No intervalo de 43 a 45 GPa os valores são praticamente idênticos e, abaixo desse intervalo, os valores estimados pela curva polinomial são superiores aos propostos pelos autores. Já os valores acima de 45 GPa, os valores estimados pela curva polinomial são inferiores aos propostos pelos autores.

A Tabela 4.11 apresenta uma comparação entre o valor médio dos resultados experimentais do módulo de Elasticidade estático e o valor obtido analiticamente em função do módulo dinâmico.

Tabela 4.11 - Diferença entre os valores experimentais e analíticos do módulo de Elasticidade estático

Concreto	Idade (dias)	Ec (GPa)			Ec (GPa)		Ec (GPa)	
		Experimental	Equação Polinomial	Dif. (%)	Código Britânico BS 8110 - 2	Dif. (%)	Lyndon e Baladran	Dif. (%)
C1	14	33,40	34,40	2,99	31,66	-5,20	34,05	1,93
	28	35,95	35,34	-1,69	33,21	-7,61	35,09	-2,40
	56	38,05	36,21	-4,83	34,78	-8,61	36,14	-5,03
C2	14	36,82	36,32	-1,36	34,98	-5,01	36,27	-1,49
	28	38,62	37,34	-3,30	37,06	-4,03	37,67	-2,45
	56	37,05	37,50	1,22	37,41	0,98	37,91	2,32
C3	14	36,68	36,84	0,43	36,00	-1,85	36,96	0,76
	28	39,99	37,63	-5,89	37,71	-5,70	38,11	-4,70
	56	41,29	38,30	-7,24	39,34	-4,73	39,20	-5,05
C4	14	36,07	37,21	3,16	36,78	1,95	37,48	3,91
	28	36,39	37,45	2,90	37,29	2,47	37,83	3,94
	56	37,18	38,09	2,44	38,80	4,36	38,84	4,47
C5	14	35,57	37,43	5,23	37,25	4,72	37,80	6,27
	28	36,76	37,68	2,51	37,83	2,90	38,19	3,88
	56	37,95	38,49	1,43	39,85	5,01	39,55	4,21

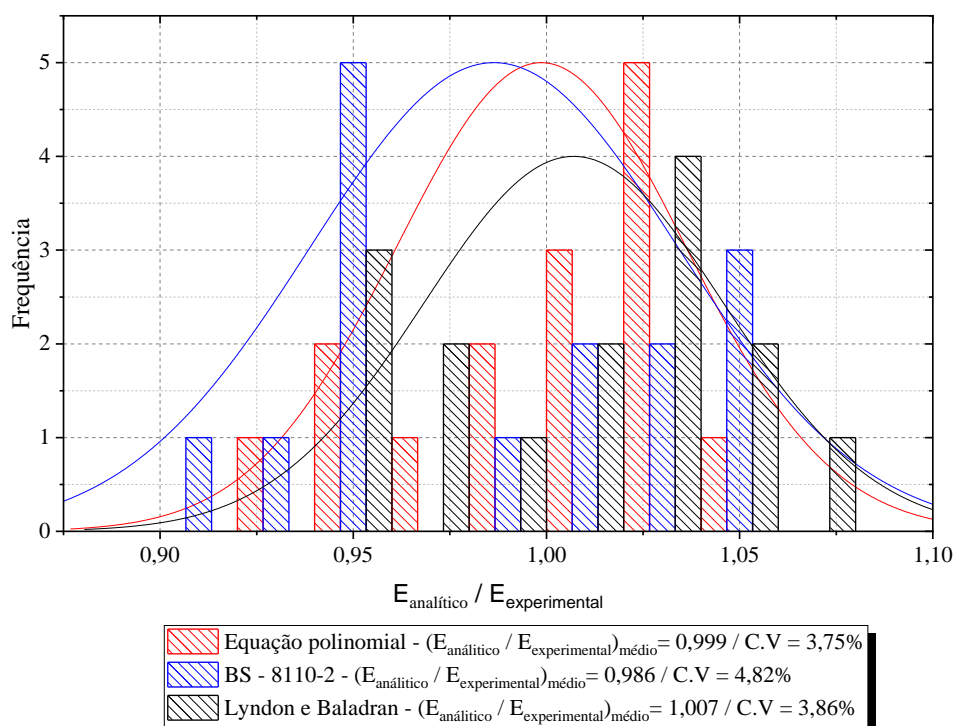
Fonte: O autor (2020)

Na Tabela 4.11, observa-se a maior diferença na estimativa do módulo de Elasticidade de 7,24% para a equação polinomial, 8,61% para a equação fornecida pelo código britânico BS 8110 – 2 (1985) e 6,27% pela equação proposta por Lyndon e Baladran (1986). Já os mínimos foram 0,43 % para a equação polinomial, 0,98% para o código britânico BS 8110 – 2 (1985) e 0,76% pela equação proposta por Lyndon e Baladran (1986).

Na Figura 4.23 é realizada a comparação por meio de um histograma e uma curva normal a relação entre a estimativa analítica e experimental ($E_{\text{analítico}}/E_{\text{experimental}}$) do módulo de

Elasticidade estático a partir do módulo de Elasticidade dinâmico, obtidos por meio do ensaio de ressonância acústica nas idades de 14, 28 e 56 dias.

Figura 4.23 - Comparação entre as equações analíticas E_d x E_c obtidas por outros autores



Através da Figura 4.23, os valores analíticos obtidos pela equação polinomial apresentaram relação $E_{\text{analítico}}/E_{\text{experimental}} = 0,999$, a relação obtida pela equação proposta pela BS 8110 – 2 (1985) igual a $E_{\text{analítico}}/E_{\text{experimental}} = 0,986$, para a equação proposta por Lyndon e Baladran $E_{\text{analítico}}/E_{\text{experimental}} = 1,007$. A equação polinomial apresentou o menor coeficiente de variação $C.V = 3,75\%$, para as equações propostas pela BS 8110 – 2 (1985) e Lyndon e Baladran foram obtidos $C.V = 4,82\%$ e $3,86\%$, apresentando pouca divergência entre a equação proposta pela pesquisa. A curva de correlação obtida na presente pesquisa é válida para o intervalo de módulo de Elasticidade dinâmico e estático indicado na Tabela 4.12 de acordo com os concretos desenvolvidos na presente pesquisa. O intervalo foi considerado a partir da curva ajustada que apresentou maior coeficiente de determinação com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.12 - Intervalo de referência dos valores envolvidos

Elemento	E_d (GPa)		E_c (GPa)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
CP (150 x 300)	39,49	48,01	33,55	38,90

Fonte: O autor (2020)

4.4 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO (IE)

4.4.1 Relação do índice esclerométrico entre os elementos analisados

A Tabela 4.13 apresenta os valores de médios de IE juntamente com o desvio padrão (σ) e coeficientes de variação (CV) dos resultados.

Tabela 4.13 – Resultados do IE

Concreto	Índice Esclerométrico								
	14 dias			28 dias			56 dias		
	IE ₁₄	σ	CV (%)	IE ₂₈	σ	CV (%)	IE ₅₆	σ	CV (%)
C1	29	1,25	4,27	30	1,11	3,72	31	0,67	2,18
C2	32	1,47	4,60	33	0,52	1,54	35	0,76	2,16
C3	32	1,47	4,55	33	1,60	4,85	35	1,33	3,83
C4	35	0,84	2,37	38	0,92	2,43	38	0,73	1,94
C5	36	0,62	1,70	41	0,73	1,80	41	1,09	2,66

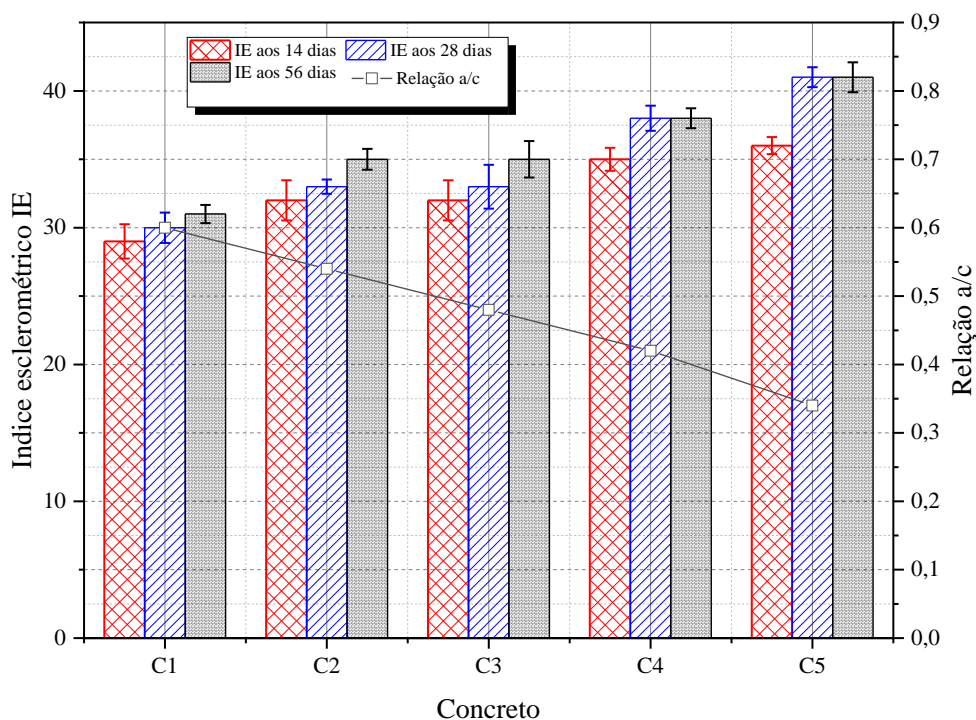
Fonte: O autor (2020)

O maior valor obtido para o ensaio IE foi igual a 41 no concreto C5 com a idade de 28 e 56 dias. O menor valor obtido do IE foi de 29 no concreto C1 aos 14 dias.

O maior valor de coeficiente de variação foi 4,85 % para o concreto C3 na idade de 28 dias denotando-se que a média em relação ao desvio padrão não ultrapassou 10%, logo, tem-se uma boa representatividade dos valores coletados para o IE.

Na Figura 4.24 são comparados os valores de IE para cada um dos concretos e a sua evolução com as idades. As barras verticais ao centro representam o desvio padrão. É possível verificar que todos os concretos apresentaram aumento gradativo nos valores de IE com o avanço.

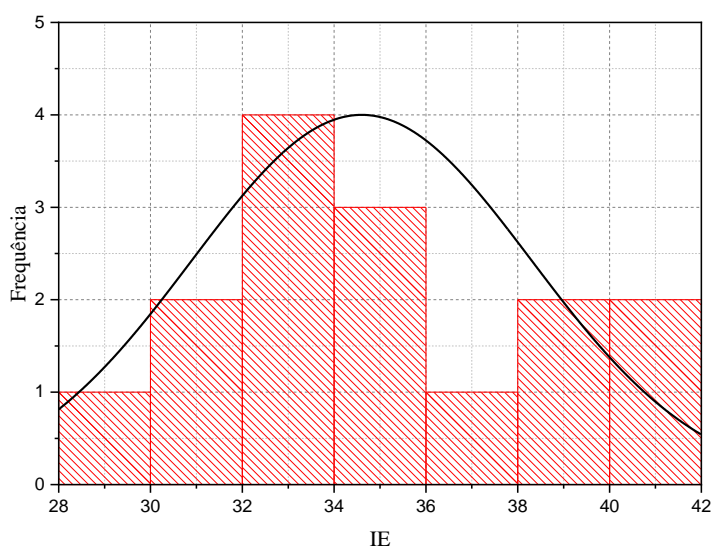
Figura 4.24 - Evolução dos IE ao longo da idade



Fonte: O autor (2020)

Para verificar a normalidade dos dados, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk com nível de significância de 5%, elaborado um histograma de distribuição e uma curva normal conforme apresentado na Figura 4.25. Foi constatado que os dados obtidos para IE nas idades de 14, 28 e 56 são do tipo normais.

Figura 4.25 - Histograma de distribuição e curva normal dos resultados de ensaio IE



Fonte: O autor (2020)

4.4.2 Curvas de correlação simples

A curva que melhor representam as correlações IE x f_c , foi obtida após a realização de testes com as seguintes equações de curvas.

- a) Linear: $y = a(IE) + b$
- b) Potência: $y = a(IE)^b$
- c) Exponencial: $y = \exp^{a(IE)^2 + b(IE) + c}$
- d) Polinômio (2º grau): $y = a(IE)^2 + b(IE) + c$
- e) Logarítmica: $y = a + b \ln(IE + C)$

4.4.2.1 IE x f_c

Dado início ao estudo de correlação entre o IE com a resistência à compressão do concreto a Tabela 4.14 apresenta os valores de coeficiente de determinação para cada modelo de curva conforme citado.

Tabela 4.14 - Coeficiente de determinação para cada equação IE x f_c

Relação	Tipo de curva	Equação	R ²
IE x f_c	Linear	$f_c = 2,4505(IE) - 46,18592$	0,890
	Potência	$f_c = 0,02016(IE)^{2,12955}$	0,875
	Exponencial	$f_c = e^{(-0,00397(IE)^2 + 0,34396(IE) - 3,47107)}$	0,906
	Polinômio (2º grau)	$f_c = -0,06603(IE)^2 + 7,06273(IE) - 125,9945$	0,900

Fonte: O autor (2020)

Dentre todas as equações de curvas analisados, a curva exponencial foi a que apresentou o maior coeficiente de determinação $R^2 = 0,906$, praticamente igual a 1, denotando correlação entre os parâmetros de resistência e índice esclerométrico.

A curva de correlação obtida para todos os concretos analisados é apresentada na Figura 4.26. Para o limite de confiança adotou-se um intervalo de confiança de 95%, que se refere a existência de 95% de chances a verdadeira curva de regressão.

Pesquisas desenvolvidas por Tsioulou et al (2017), apresentaram valor de $R^2 = 0,95$ para correlação entre IE x f_c obtidas a partir de equações exponenciais, bem como a equação apresentada na pesquisa aqui desenvolvida.

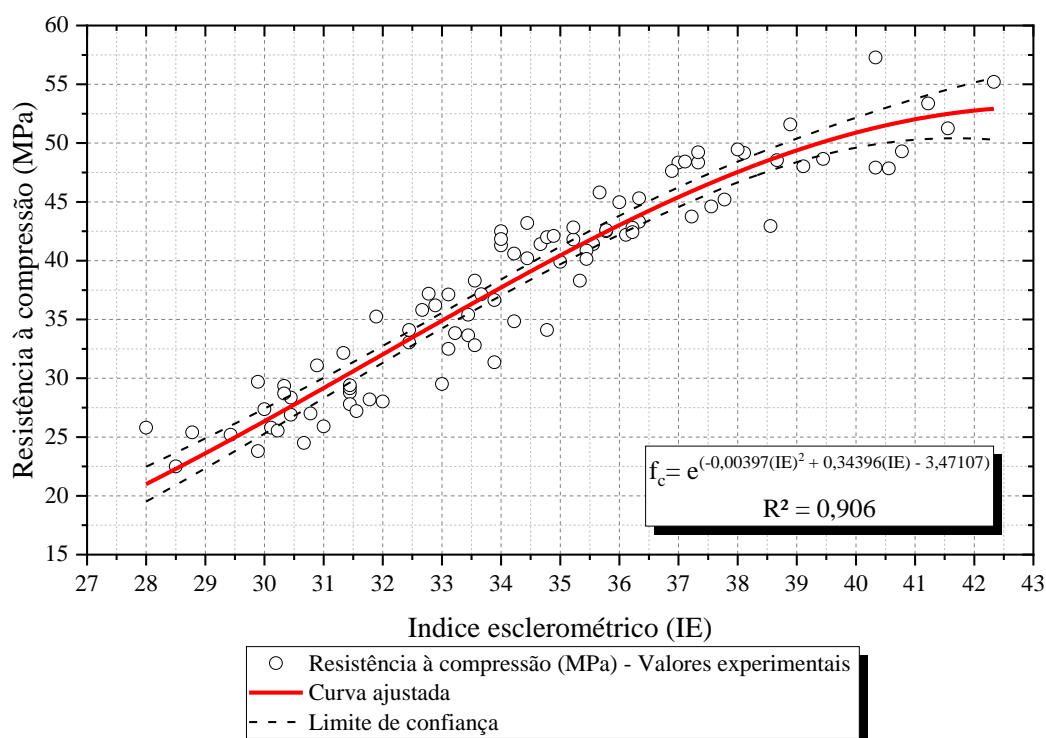
Um fator importante a ser considerado na correlação entre IE x f_c é a presença de carbonatação. De acordo com a ABNT NBR 7584 (2012), o resultado do IE em regiões

carbonatadas devem ser corrigidos por meio coeficientes de correção, uma vez que conforme Malhotra (2004) os resultados de IE em superfícies carbonatadas podem apresentar valores 50% maiores do que em superfícies não carbonatadas.

Pesquisas desenvolvidas por Kim et al (2009), apresentam coeficientes de correção para o IE em regiões carbonatadas, onde, constata que a correção do IE em concretos com resistência acima de 50 MPa apresentaram resultados pouco precisos quando comparados com os resultados experimentais. Já concretos com resistências abaixo de 25 MPa a utilização de coeficientes de correção em superfícies carbonatadas apresentaram valores próximos dos experimentais, dessa maneira denota-se que a influência da carbonatação na relação entre IE x f_c pode variar de acordo com a resistência do concreto.

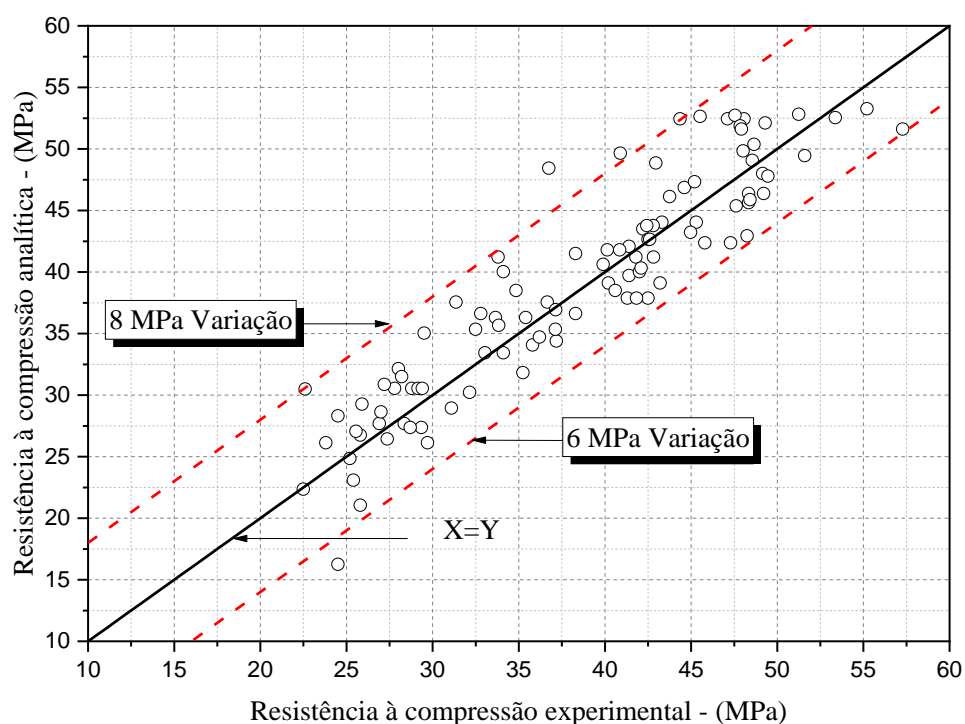
Já norma britânica BS 1881: Part 2 (1986), cita que a influência da carbonatação na superfície do concreto se torna significativa em concretos com idade acima de 3 meses. Dessa maneira, a presente pesquisa não aplicou coeficientes de correção nos resultados IE aqui obtidos uma vez que a maior idade em que o ensaio foi realizado foi na data de 56 dias.

Figura 4.26 - Curva de correlação IE x f_c



Fonte: O autor (2020)

Figura 4.27 - Valores experimentais x valores analíticos para resistência à compressão através do IE

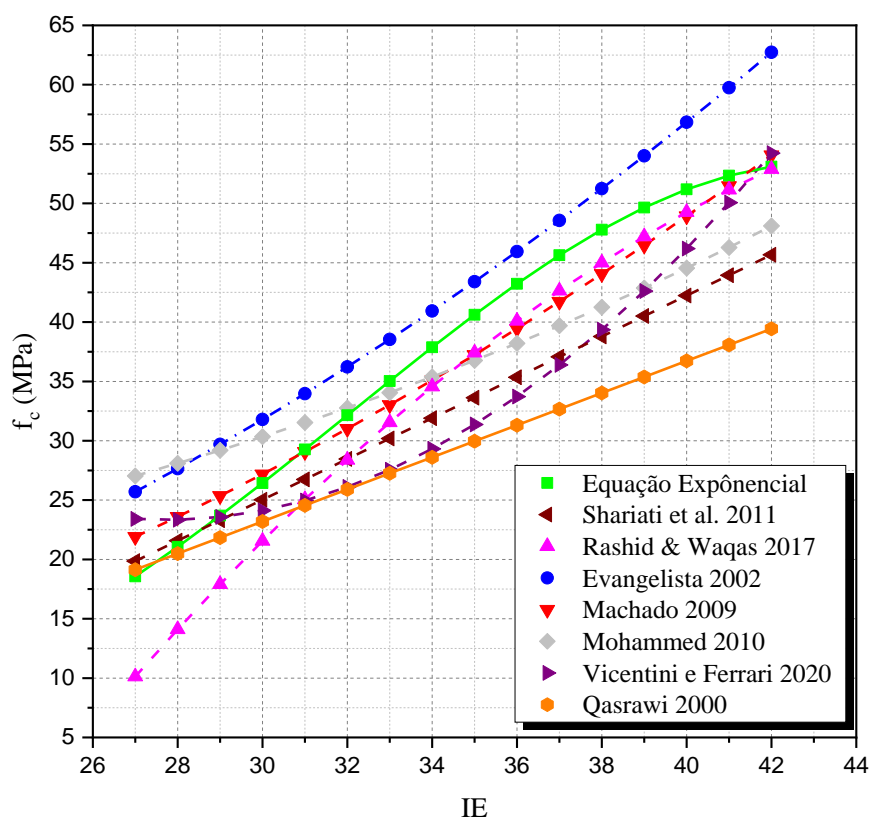


Fonte: O autor (2020)

Na Figura 4.27 apresenta-se uma comparação entre a resistência à compressão experimental com a resistência à compressão estimada analiticamente pela equação exponencial. É possível verificar que a maioria dos dados está muito próxima da linha de igualdade $X = Y$. Permitindo observar um equilíbrio nos valores acima da linha de igualdade perfazendo uma variação de aproximadamente 8 MPa e 6 MPa para valores abaixo da linha de igualdade. Logo a razão média entre as resistências experimentais e as resistências analíticas é igual a 0,99.

Na Figura 4.28 a curva exponencial aqui obtida é comparada com apresenta curvas propostas por outros autores.

Figura 4.28 - Comparação com curvas IE x f_c obtidas por outros autores

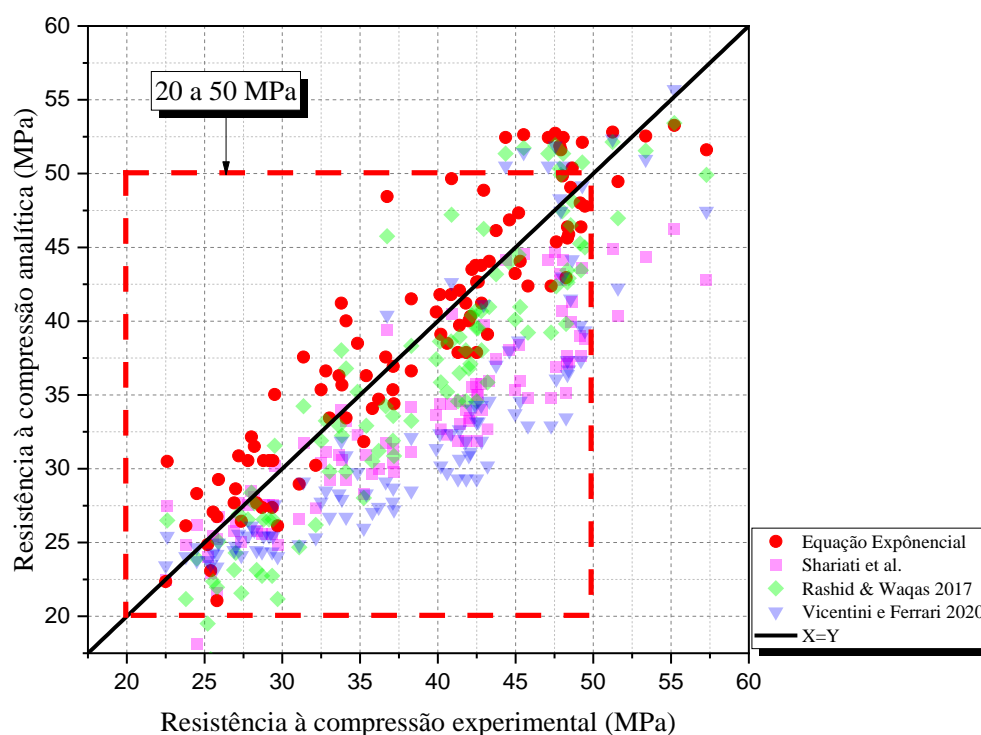


Fonte: O autor (2020)

Da Figura 4.28 observa-se que as curvas propostas por outros autores se diferem muito entre si, tornando essa diferença mais acentuada com o aumento dos valores de IE. Essa constatação mostra a importância do desenvolvimento de curvas de correlação adequadas para o concreto que se deseja analisar. Na Figura 4.27 observa-se que as curvas propostas por Rashid e Waqas (2017) e Vicentini e Ferrari (2020) foram aquelas que mais se aproximaram a curva exponencial.

A Figura 4.29 mostra a relação dos valores obtidos experimentalmente com os valores analíticos estimados pelas equações que mais se aproximaram da equação exponencial.

Figura 4.29 - Valores experimentais x analíticos para a Resistência à compressão de acordo com diversos autores



Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.29 revela que as equações propostas por Rashid e Waqas (2017), Sheriat et al. (2009), Vicentini e Ferrari (2020) apresentam valores muito próximos ao proposto pela equação exponencial dentro de um intervalo de resistência de 20 a 50 MPa. Assim a curva de correlação aqui obtida é válida para o intervalo de resistência e de IE apresentado na Tabela 4.15. Os valores foram obtidos por meio da curva de correlação ajustada com limite de confiança de 95%.

Tabela 4.15 - Intervalo de referência dos valores envolvidos

Elemento	f_c (MPa)		IE	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
CP (150 x 300)	21,00	52,92	28	42

Fonte: O autor (2020)

4.5 MÉTODOS COMBINADOS

Neste item é apresentado o estudo de regressão não linear múltipla com o objetivo de indicar a curva que melhor represente as correlações entre os ENDS com as vistas, à estimativa do parâmetro de Resistência à compressão.

4.5.1 VPU x IE x f_c

A curva que melhor representa as correlações foi obtida após a realização de testes com as seguintes equações de curvas. Os resultados de R^2 para cada curva analisada são apresentados na Tabela 4.16

- a) $f_c = a + b(VPU) + c (IE)$
- b) $f_c = a(VPU^b)(IE^c)$
- c) $f_c = a (VPU)^2 + b (IE)^2 + c (VPU) + d (IE) + e$
- d) $f_c = e^{(a+b(VPU)+c(IE))}$

Tabela 4.16 - Modelo de curvas e coeficientes de determinação da regressão múltipla VPU x IE x f_c

Relação	Equação	R^2
VPU x IE x f_c	$f_c = -106,7884 + 0,01486(VPU) + 2,12693 (IE)$	0,901
	$f_c = 2,8614 \times 10^{-10}(VPU^{2,24194})(IE^{1,86191})$	0,893
	$f_c = 1,53588 \times 10^{-6} (VPU)^2 - 0,02655 (IE)^2 + 0,02776(VPU) + 4,01513 (IE) - 166,485$	0,900
	$f_c = e^{(-0,67371+5,2453 \times 10^{-4}(VPU)+0,05126(IE))}$	0,883

Fonte: O autor (2020)

O modelo de curva que apresentou o melhor coeficiente de determinação foi a curva $f_c = -106,7884 + 0,01486(VPU) + 2,12693 (IE)$ com elevado valor de $R^2 = 0,901$. No entanto, mesmo com a correlação múltipla, não foi obtido uma melhora no valor de R^2 quando comparado ao valor da correlação simples entre f_c e IE ($R^2 = 0,906$).

O valor aqui encontrado de R^2 para a correlação múltipla é praticamente o mesmo valor obtido por Vicentini e Ferrari (2020) e até 13% maior do que aquele encontrado por Rashid e Waqas (2017).

O fato da utilização de métodos ENDS combinados não apresentar melhora no valor de R^2 ocorre uma vez que a variável explicativa apresenta uma correlação muito alta com a variável dependente, como é o caso da variável dependente que representa o IE. Já a variável dependente que representa o VPU apresentou um nível de correlação menor, não influenciando no aumento

do coeficiente de determinação. A Tabela 4.17 apresenta o nível de significância de cada uma das variáveis de acordo com a equação que foi obtida. É possível observar por meio do “valor – p”, que a variável IE apresenta maior influência na curva de correlação em relação a variável VPU.

Tabela 4.17 - Nível de significância das variáveis

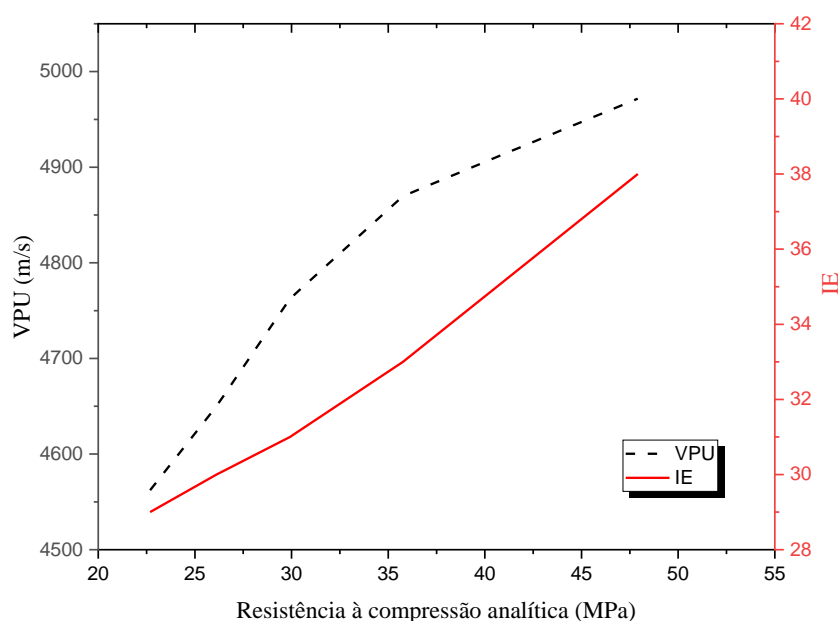
Variável	Valor – p
VPU	$2,75 \cdot 10^{-5}$
IE	$1,05 \cdot 10^{-34}$

Fonte: O autor (2020)

De acordo com o ACI 228 1R (2003), casos onde ocorre pequeno aumento na acurácia por métodos combinados não justifica a utilização dos métodos de forma combinada.

A Figura 4.30 apresenta uma análise do comportamento da equação referente aos valores de VPU e IE, sendo a linha tracejada em preto representando o comportamento da primeira variável (VPU) na equação de correlação e a linha vermelha representando a segunda variável (IE). Observa-se que, com o aumento das variáveis (VPU e IE) ocorre o aumento da resistência à compressão analítica do concreto. O resultado revela a mesma tendência de curva para cada variável quando analisadas de maneira isolada.

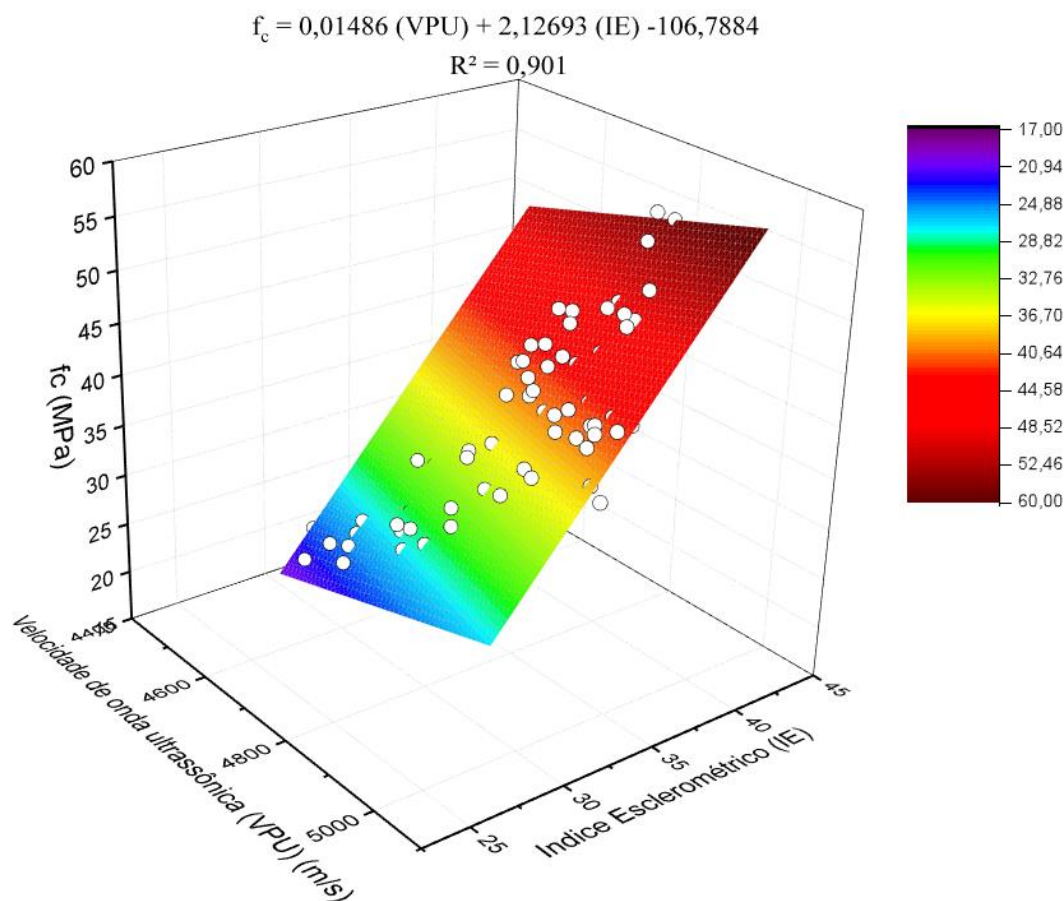
Figura 4.30 - Análise do VPU e IE para o método combinado



Fonte: O autor (2020)

O comportamento de f_c em função de VPU e IE através da correlação múltipla, obtida através de todos os concretos é apresentado por meio de uma superfície de resposta tridimensional conforme Figura 4.31. Como o gráfico de superfície não apresenta facilidade de leitura, visando a sua utilização, são indicadas as curvas de correlação múltiplas na Figura 4.32.

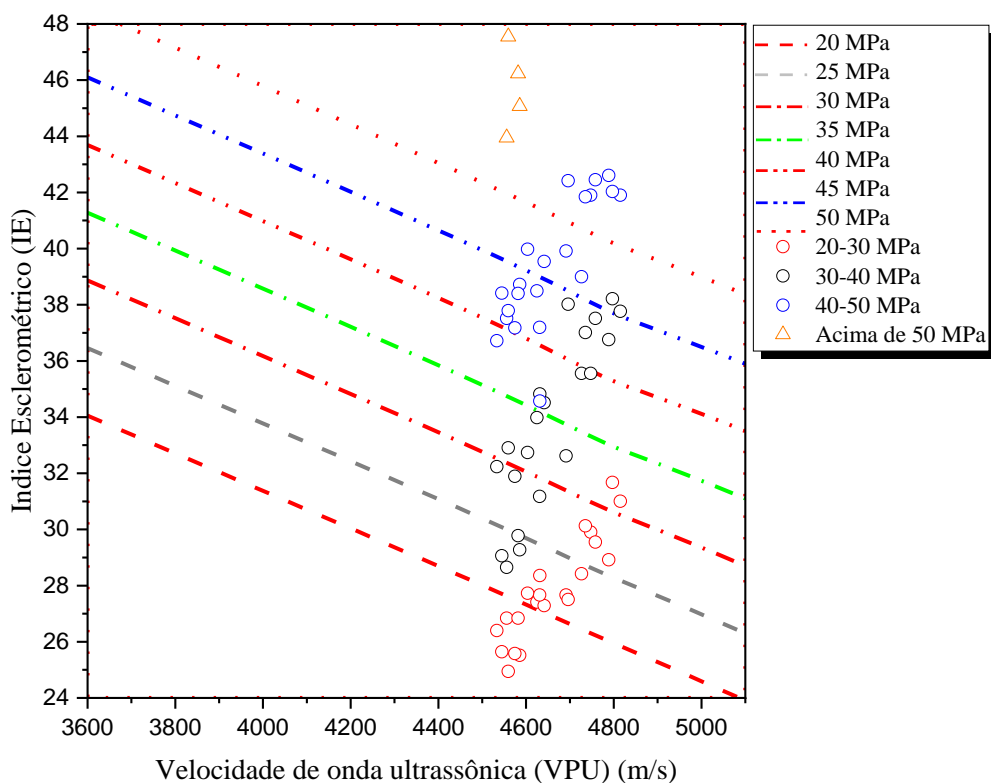
Figura 4.31 - Gráfico de comportamento de f_c em função de VPU e IE



Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.32 representa a curva de Iso-resistência conforme metodologia indicada pela Rilem (1993) por meio do método conhecido como SonReb. Para a construção das curvas utilizou-se a equação de $R^2 = 0,901$. É notada uma pequena dispersão no intervalo das curvas de Iso-resistências em relação aos resultados experimentais e, isso ocorre devido as diferentes proporções e resultados de resistência à Compressão. As curvas obtidas são capazes de estimar a resistência à compressão de concretos num intervalo de 20 a 50 MPa (produzidos com os mesmos materiais aqui utilizados). Para os ensaios não destrutivos os intervalos variam de 24 a 50 para o ensaio IE e 3600 a 5200 m/s para VPU.

Figura 4.32 - Curvas de Iso-resistência

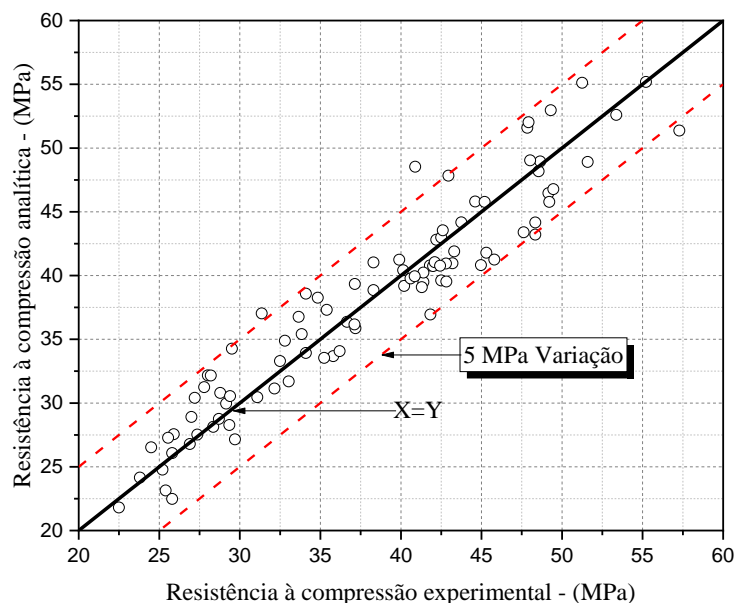


Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.33 apresenta comparação entre a resistência à compressão experimental e aquela obtida analiticamente por meio da equação linear de correlação múltipla. É possível verificar que a maioria dos pontos se encontram posicionados muito próximos da linha de igualdade $X = Y$, sendo a razão média entre as resistências experimentais e analíticas de 1,0001.

Os dados próximos da linha de igualdade permitem observar um equilíbrio nos valores acima ou abaixo da linha de igualdade perfazendo uma variação de aproximadamente 5 MPa.

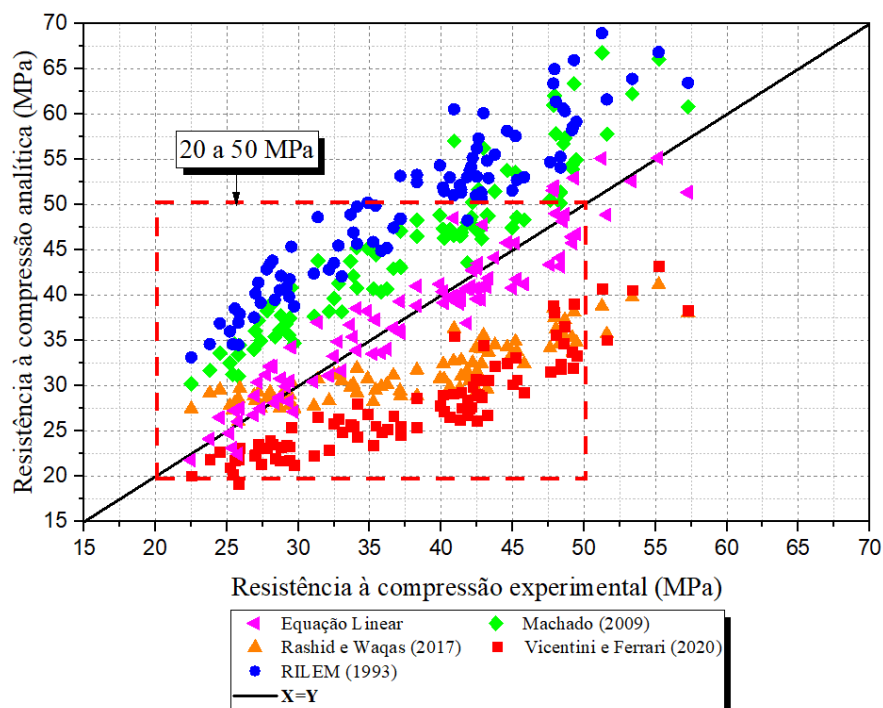
Figura 4.33 - Valores experimentais versus analíticos valores preditos para resistência à compressão através da correlação múltipla VPU x IE x f_c



Fonte: O autor (2020)

A Figura 4.34 apresenta comparação dos valores de resistência obtidos experimentalmente com os valores analíticos por meio de equações propostas por outros autores.

Figura 4.34 - Valores experimentais versus analíticos para a resistência à compressão através da correlação múltipla VPU x IE x f_c e comparação com diversos autores



Fonte: O autor (2020)

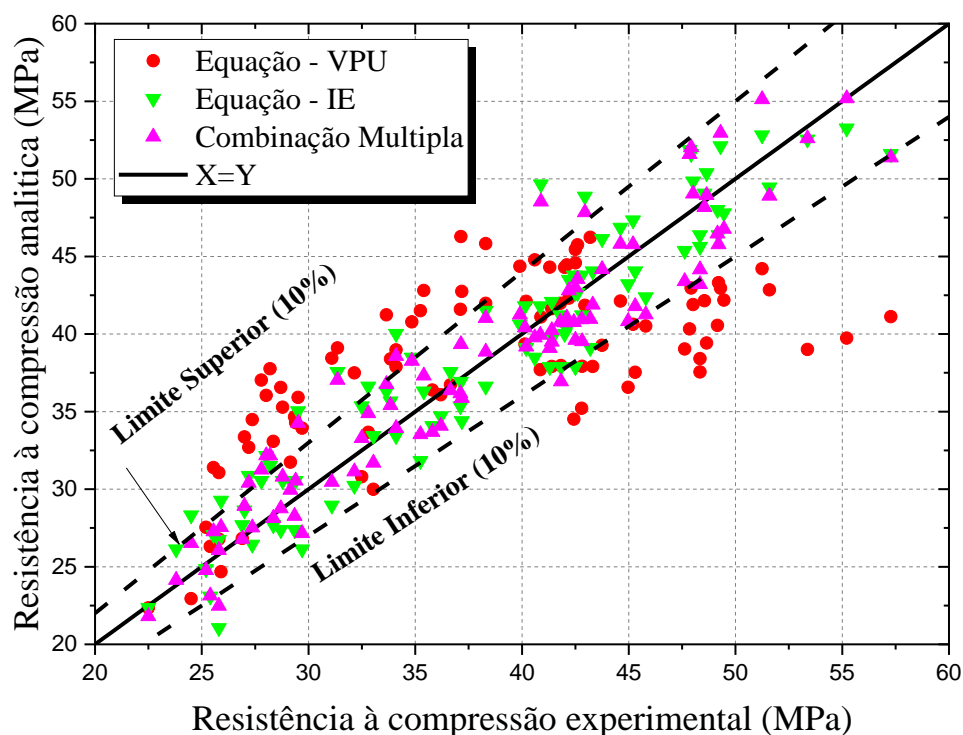
Através da análise da Figura 4.34 observa-se que as equações utilizando os coeficientes fornecidos pela Rilem (1993) e Machado (2009) apresentaram valores analíticos maiores do que os valores obtidos experimentalmente, superestimando-os. Já as equações de correlação propostas por Rashid e Waqas (2017) e Vicentini e Ferrari (2020) apresentaram valores menores do que os valores experimentais, subestimando-os.

No entanto é possível observar que as curvas obtidas a partir de equação linear apresentaram valores analíticos bem próximos dos valores experimentais, pois é possível verificar que a maioria dos pontos estão muito próximos da linha de igualdade $X = Y$, em um intervalo de resistência de 20 a 50 MPa.

4.5.1.1 Análise dos resultados das equações de correlação para estimativa de f_c

As curvas de correlação, simples e combinada, são aqui agrupadas para verificação da precisão de cada modelo obtido neste trabalho. Para tanto, os resultados de resistência experimentais são confrontados com aqueles analíticos conforme indicado na Figura 4.35.

Figura 4.35 - Valores experimentais - analíticos para a resistência à Compressão: correlação simples e múltipla



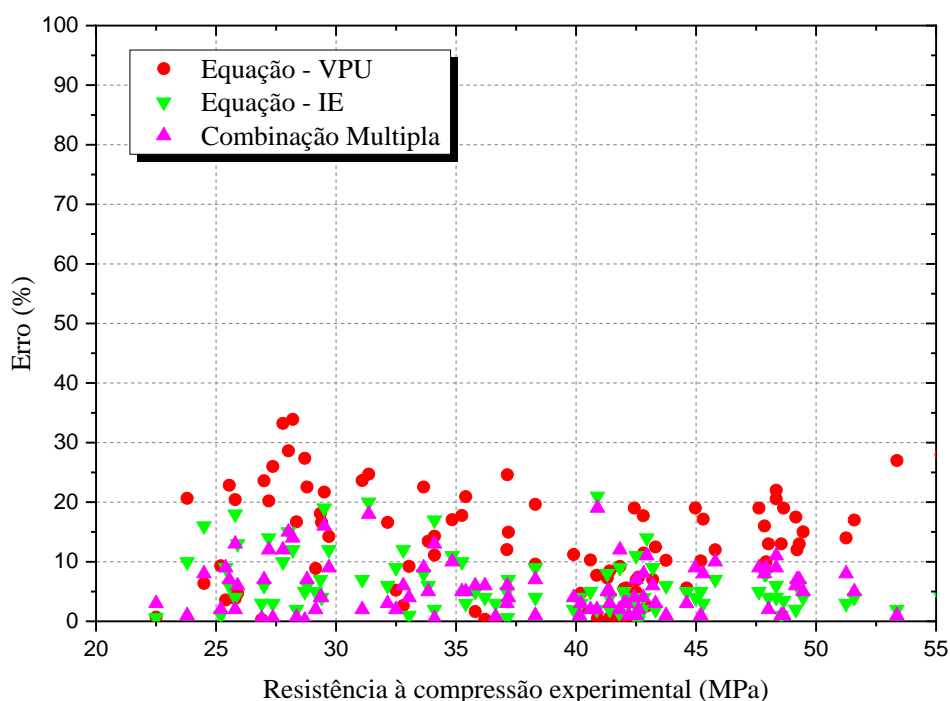
Fonte: O autor (2020)

A análise da Figura 4.35 permite observar que em sua maioria os resultados analíticos apresentados por cada modelo de correlação estão próximos da linha de igualdade, e que a

equação de correlação simples do IE e a equação de combinação múltipla, apresentaram valores muito próximos a linha de igualdade em praticamente toda a faixa de valores de resistência estudados. De uma maneira geral os valores analíticos superestimados ou subestimados, ficaram em um intervalo de variação de 10%.

Para análise do nível de precisão de cada modelo calculou-se a diferença percentual existente para estimar a resistência à compressão conforme apresentado na Figura 4.36. É possível observar que a curva de correlação simples elaborada do VPU, foi a que apresentou erros mais expressivos, sendo em sua maioria maior do que 10%, chegando em algumas resistências a apresentar valores próximos de até 20%. Já as equações elaboradas a partir da combinação simples IE x f_c , e o modelo de combinação múltipla VPU x IE x f_c , apresentaram porcentagem de erro baixos e próximos a 10%.

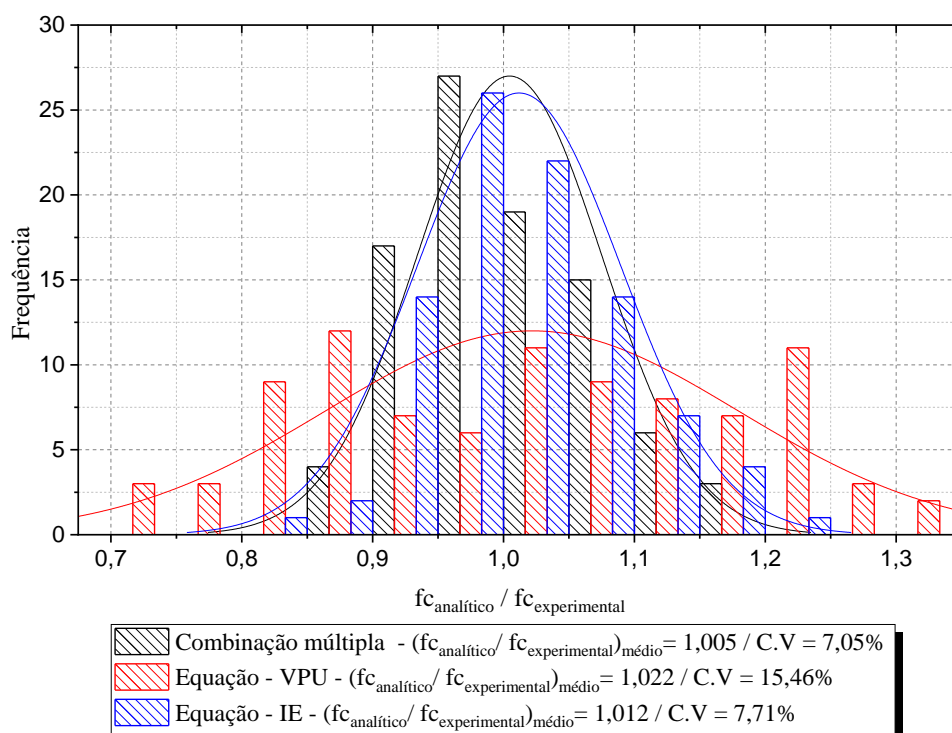
Figura 4.36 – Percentual de erro para f_c apresentados nas equações de correlação



Fonte: O autor (2020)

Na Figura 4.37 é realizada a comparação por meio de um histograma e uma curva normal a relação entre a estimativa analítica e experimental (f_c analítico/ f_c experimental) da resistência a compressão, obtidos por meio das equações de correlação aqui desenvolvidas com os valores de resistência à compressão nas idades de 14, 28 e 56 dias.

Figura 4.37 – Comparação entre as equações analíticas para estimativa de f_c obtidas na pesquisa

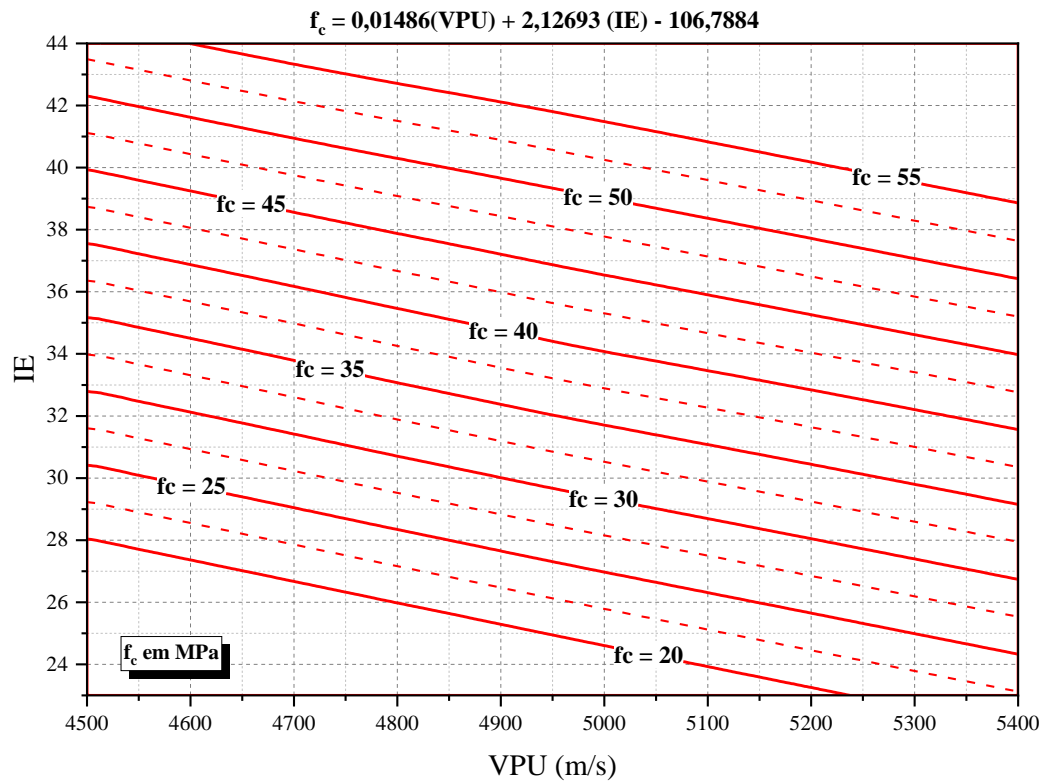


Fonte: O autor (2020)

Através da Figura 4.37, os valores analíticos obtidos pela equação de correlação múltipla apresentaram relação $f_{c\text{ analítico}} / f_{c\text{ experimental}} = 1,005$, a relação obtida pelas equações de correlação simples envolvendo os ensaios VPU e IE apresentaram uma relação $f_{c\text{ analítico}} / f_{c\text{ experimental}} = 1,022$ e $1,012$. Verifica-se também que a curva normal referente a equação de correlação múltipla VPU x IE x f_c e correlação simples IE x f_c estão praticamente iguais, esta relação foi analisada anteriormente, por meio de estudo estatístico do nível de significância da IE na equação de correlação. A equação de correlação múltipla apresentou o menor coeficiente de variação $C.V = 7,05\%$, para as demais equações foram obtidos $C.V = 15,46\%$ para equação VPU x f_c e $7,71\%$ para IE x f_c .

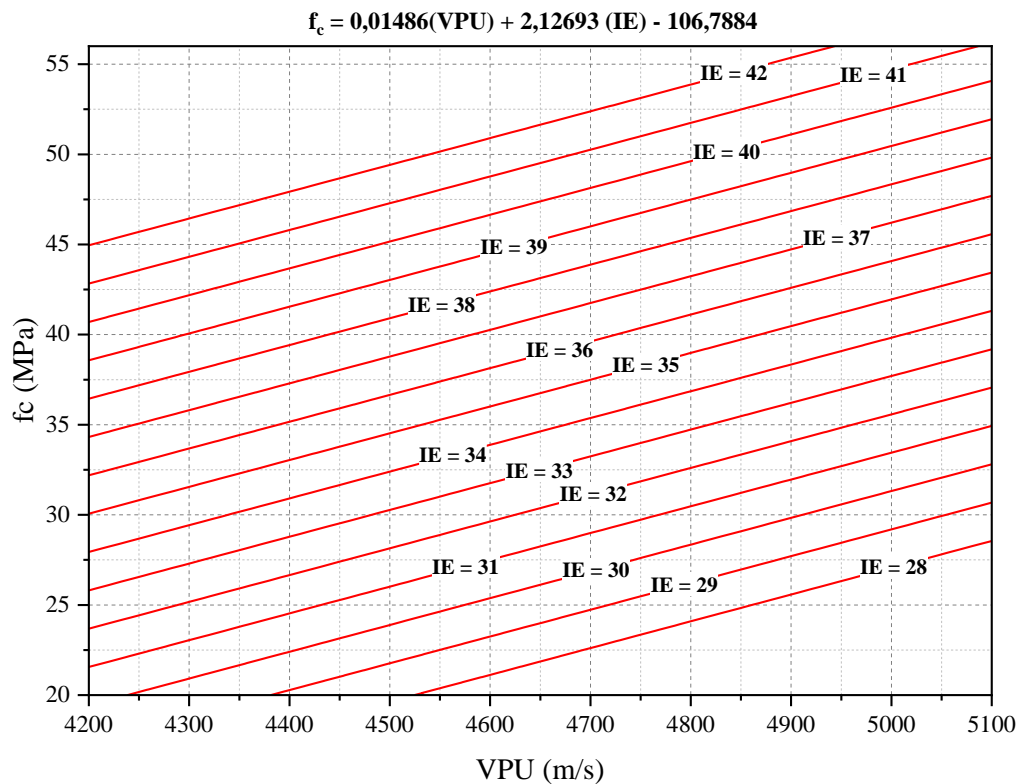
A partir do estudo desenvolvido na presente pesquisa são apresentadas através das Figuras 4.38 e 4.39 as curvas de Iso-resistência desenvolvidas para a relação VPU x IE x f_c , conforme recomendado pela RILEM (1993).

Figura 4.38 - Curva de correlação (VPU x IE x f_c) proposta pela pesquisa – Modelo 1



Fonte: O autor (2020)

Figura 4.39 - Curva de correlação (VPU x f_c x IE) proposta pela pesquisa – Modelo 2



Fonte: O autor (2020)

Os dois modelos de curvas de Iso-resistência propostos permitem a estimativa da resistência do concreto a partir da combinação dos ensaios VPU e IE, sendo que, no modelo 1 os valores de VPU estão nas abscissas e IE nas ordenadas, já o modelo 2 apresenta os valores de VPU nas abscissas e f_c nas ordenadas. Os dois modelos fornecem valores analíticos muito próximos dos encontrados nos resultados experimentais, uma vez que são válidos para os concretos desenvolvidos na pesquisa aqui apresentada.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa apresentou a utilização das técnicas não destrutivas de velocidade de propagação de onda ultrassônica, índice esclerométrico e ressonância acústica para a estimativa da resistência à compressão e módulo de Elasticidade a partir de curvas de correlação geradas a partir de 5 diferentes concretos que apresentaram evolução de resistência à compressão e módulo de Elasticidade ao longo da idade variando entre 25 a 50 MPa. Os ensaios foram realizados quando os concretos tinham 14, 28 e 56 dias de idade.

A partir do amplo programa experimental realizado e da grande quantidade de dados obtidos, foi possível extrair as seguintes conclusões:

- A melhor correlação entre VPU x f_c foi obtida por meio da equação polinomial de 2º grau com $R^2 = 0,595$;

$$f_c = -6,2846 \times 10^{-5} (\text{VPU})^2 + 0,657 (\text{VPU}) - 1667,978$$

- A melhor correlação entre IE x f_c foi obtida por meio da equação exponencial com $R^2 = 0,906$;

$$f_c = e^{(-0,00397(\text{IE})^2 + 0,34396(\text{IE}) - 3,47107)}$$

- A estimativa da resistência à compressão do concreto por meio da correlação múltipla de ENDS correlacionando VPU x IE x f_c de acordo com a metodologia SonReb indicada pela Rilem (1993), apresentou valor de $R^2 = 0,901$ a partir de da equação;

$$f_c = -106,7884 + 0,01486(\text{VPU}) + 2,12693 (\text{IE})$$

- As análises dos valores obtidos por meio das equações analíticas obtidas na pesquisa mostraram a importância da elaboração de curvas de correlação específicas para o concreto a ser investigado;
- O estudo entre o módulo dinâmico e estático apresentou a relação entre os parâmetros de módulo de elasticidade, bem como a influência da resistência do concreto para a elaboração das equações de correlação;
- Os estudos a partir das superfícies tridimensionais de respostas permitiram avaliar o comportamento da curva de correlação múltipla para o parâmetro de resistência à compressão;
- No geral a porcentagem de erro apresentada nas equações analíticas permaneceu dentro de 10%;

- A elaboração de ábacos de correlação múltipla através de curvas de Iso-resistência auxilia na estimativa da resistência a compressão para concretos elaborados de acordo com o delimitado na pesquisa, no entanto indica-se a utilização de um fator de segurança para a previsão real da resistência à compressão de estruturas “in loco”.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se a continuidade do estudo de elaboração de curvas de correlação simples e combinada para a estimativa da resistência à compressão e módulo de elasticidade de concretos com resistência à compressão variando entre 55 a 90 MPa, bem como concretos reforçados com fibra.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 228.1R**. In-Place Methods to Estimate Concrete Strength. Detroit, 2013.

_____ **ACI 440.2R**. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C597**. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. West Conshohocken, 2016.

_____ **ASTM C805 / C805M**. Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. West Conshohocken, 2013.

_____ **ASTM E1876**. Standard Test Method for dynamic young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio impulse excitation of vibration. ASTM International, West Conshohocken, 2015.

_____ **ASTM C215**. Standard Test Method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM International, West Conshohocken, 2014.

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

_____ **ABNT NBR 5739**. Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____ **ABNT NBR 6118**. Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____ **ABNT NBR 6467**. Agregados – Determinação do inchamento de agregado miúdo – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

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

_____ **ABNT NBR 7584**. Concreto endurecido: Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão. Rio de Janeiro, 2012.

_____ **ABNT NBR 8802.** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

_____ **ABNT NBR 8522.** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de Elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

_____ **ABNT NBR 12655.** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____ **ABNT NBR NM 45.** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios, 2006.

_____ **ABNT NBR NM 52.** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente, 2009.

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

_____ **ABNT NBR NM 58.** Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, 1996.

_____ **ABNT NBR NM 67.** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, 1998.

_____ **ABNT NBR NM 78.** Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, 1998.

_____ **ABNT NBR NM 248.** Agregados – Determinação da composição granulométrica, 2003.

ADAMATTI, D. S.; LORENZI, A.; CHIES, J.A.; SILVA FILHO, L.C.P. Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: Estudo dos parâmetros tecnológicos intervenientes. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 2, p. 358–385, 2017.

ALWASH, M.; BREYSSE, D.; SBARTAI, Z. M. Non-destructive strength evaluation of concrete: Analysis of some key factors using synthetic simulations. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 235–345, 2015.

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região noroeste do Paraná.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1881: Part 201.** Guide to the use of nondestructive methods or test for hardened concrete. London, 1986.

_____ **BS 1881: Part 202.** Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer. London, 1986.

_____ **BS 1881: Part 203.** Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. London, 1986.

_____ **BS 8110: Part 2.** Code of practice for special circumstances. London, 1985.

BUNGEY.J.H., MILARD.S.G., GRANTHAN.M.G. **Testing of concrete in structures.** 4^a edition. London. Taylor & Francis. 2006.

BREYSSE. D. Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 139 – 163, 2012.

TORALLES-CARBONARI, B. M., CAVALARO, S. H., MENDES CASTANHA, J. C., GUACELLI. P. A. G., CATISTE SILVA, C. Utilização do método ultra-sônico para valiação da performance do concreto de alto desempenho. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, p. 494–511, 2010.

CHUNG, H. W., LAW, K. S. Diagnosing in situ concrete bt ultrasonic pulse technique. **Concrete International**, v.5, p.42-49, 1983.

DIÓGENES, H. J. F., COSSOLINO, L. C., PEREIRA, A. H. A., EL DEBS, M. K., EL DEBS, A. L. H. C. Determinação do módulo de Elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.** v. 4, n.5, pag. 792-813, 2011.

EVANGELISTA, A. C. J. **Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

KIM, J. K., KIM, C. Y., YI, S. T., LEE, Y. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 139–144, 2009.

LIM, M. K., CAO, H. Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 1310–1315, 2013.

MACHADO, M. D., SHEHATA, L. C. D., SHEHATA, I. A. E. M. Correlation curves to Characterize Concretes Used in Rio de Janeiro by Means of Non-destructive Tests. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 2, n. 2, p. 100–111, 2009.

MALHOTRA.V.M., CARINO. N.J.; **Nondestructive testing of concrete**. 2ª edition. Detroit, pp.1-16. 2004.

METHA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª Edição. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOHAMMED, B. S., AZMI, N. J., ABDULLAHI, M. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1388 – 1397, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Trad. Salvador e Giammusso. 2ª Edição. São Paulo: PINI. 1997.

NOGUEIRA, C. L., WILLAN, K. J. Ultrasonic Testing of Damage in concrete under uniaxial compression. **ACI Materials Journal**, v.98, p.265-275, 2001.

OTANI, L. B., PEREIRA, A. H. A. Determinação do módulo de Elasticidade do concreto empregando a técnica de excitação por impulso. **ATCP Engenharia física**. São Carlos, 2017. Disponível em :<http://www.sonelastic.com/images/downloads/ITC-ET_MOE_Concretos_PT_v_1.4.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2020.

PUCINOTTI, R. Reinforced concrete structure: Nondestructive in situ strength assessment of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 331 – 341, 2015.

QASRAWI, H. S. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted. **Cement and Concrete Research**. v.30, p. 739 - 746, 2000.

RASHID, K., WAQAS, R. Compressive strength evaluation by non-destructive techniques: An automated approach in construction industry. **Journal of Building Engineering**, v. 12, p. 147–154, jul. 2017.

RILEM NDT 1. Testing of concrete by the ultrasonic pulse method. **Materials and Structures**, p. 73-82, 1972.

RILEM 43 - CND. Combined non-destructive testing of concrete. Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods. **Materials and Structures**, v. 26, p. 43-49, 1993.

RODRIGUES, G. S. S, FIGUEIREDO. E. P. Módulo de deformação do concreto pelo método ultrassônico. In: V SIMPOSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5, 2003, São Paulo - SP.

SHARIATI, M., RAMLI-SULONG, N. H., ARABNEJAD, K.H.M. M., SHAFIGH, P., SINAELI. H. Assessing the strength of reinforced concrete structures through ultrasonic pulse velocity and schmidt rebound hammer tests. **Scientific Research and Essays**. v. 6, p. 213-220, jan, 2011.

TSIOULOU, O., LAMPROPOULOS, A., PASCHALIS, S. Combined Non-Destructive Testing (NDT) method for the evaluation of the mechanical characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 66–77, jan. 2017.

VINCENTINI, J.M. **Esclerometria e velocidade de propagação de onda ultrassônica para a estimativa da resistência à compressão do concreto por meio de correlação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2017.

VINCENTINI, J.M., FERRARI. V. J. Esclerometria e velocidade de propagação do pulso ultrassônico para a estimativa da resistência à compressão do concreto por meio de curvas de correlação. **Revista Tecnológica**. 29. V. 1, p. 49-61, jan. 2020.

YAMAN, I.O., INCI, G., YESILLER, N., AKTAN, H. M. Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission. **ACI Material Journal**, November - December, p.450-457, 2001.

YILDRIM, H., SENGUL. O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1645–1652. 2011

APÊNDICE A
RESULTADOS GERAIS DOS ENSAIOS

Tabela A 1 - Valores individuais da resistência à compressão de cada CP por idade

Concreto	Idade (dias)	n° CP	fc (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C1	14	1	24,5	23,11	1,16	5,02%
		2	22,4			
		3	21,5			
		4	24,5			
		5	22,5			
		6	22,6			
		7	23,8			
	28	8	25,4	26,00	0,70	2,67%
		9	25,2			
		10	26,9			
		11	25,8			
		12	25,8			
		13	25,9			
		14	27,0			
	56	15	29,4	29,20	2,16	7,40%
		16	25,6			
		17	31,1			
		18	28,8			
		19	27,8			
		20	32,2			
		21	29,7			
C2	14	1	27,4	30,36	2,76	9,09%
		2	28,4			
		3	34,1			
		4	29,2			
		5	32,5			
		6	28,0			
		7	33,0			
	28	8	35,8	35,25	2,41	6,83%
		9	36,65			
		10	37,14			
		11	33,65			
		12	31,36			
		13	33,84			
		14	38,3			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	fc (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C2	56	15	38,3	41,00	1,45	3,53%
		16	42,2			
		17	41,8			
		18	41,4			
		19	40,2			
		20	42,5			
		21	40,6			
C3	14	1	27,2	30,60	2,88	9,41%
		2	28,7			
		3	33,8			
		4	29,4			
		5	32,8			
		6	28,2			
		7	34,1			
	28	8	36,2	35,07	2,62	7,46%
		9	29,51			
		10	35,24			
		11	35,4			
		12	37,18			
		13	37,12			
		14	34,84			
56	15	39,9	41,94	1,08	2,56%	
	16	42				
	17	43,2				
	18	42,6				
	19	42,1				
	20	41,3				
	21	42,5				
C4	14	1	41,4	41,88	1,16	2,77%
		2	43,31			
		3	41,83			
		4	42,8			
		5	40,86			
		6	42,82			
		7	40,14			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	fc (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C4	28	8	42,95	42,78	3,07	7,18%
		9	44,61			
		10	36,74			
		11	45,2			
		12	40,89			
		13	45,3			
		14	43,75			
	56	15	48,34	49,24	1,13	2,30%
		16	49,16			
		17	48,34			
		18	51,59			
		19	49,21			
		20	49,46			
		21	48,55			
C5	14	1	48,25	46,40	2,16	4,65%
		2	42,43			
		3	45,8			
		4	44,97			
		5	47,62			
		6	47,29			
		7	48,42			
	28	8	47,11	47,72	1,21	2,53%
		9	48,07			
		10	48,65			
		11	45,52			
		12	47,55			
		13	49,3			
		14	47,85			
56	15	51,25	51,06	4,57	8,95%	
	16	48,02				
	17	53,37				
	18	44,36				
	19	57,28				
	20	55,21				
	21	47,92				

Fonte: O autor (2020)

Tabela A 2 - Valores individuais de módulo de Elasticidade estático de cada CP por idade

Concreto	Idade (dias)	n° CP	Eci (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	C.V (%)		
C1	14	1	--					
		2	32,86					
		3	31,53					
		4	33,33	33,40	1,18	3,53%		
		5	34,16					
		6	33,49					
		7	35,00					
	28	8	--					
		9	35,91					
		10	36,92					
		11	38,16	35,95	2,40	6,68%		
		12	35,59					
		13	31,47					
		14	37,62					
		56	15	38,67				
			16	38,46				
			17	40,23				
			18	37,84	38,05	1,41	3,72%	
			19	36,46				
			20	38,25				
			21	36,46				
C2	14	1	--					
		2	37,75					
		3	40,18					
		4	35,44	36,82	2,26	6,13%		
		5	37,76					
		6	33,64					
		7	36,14					
	28	8	--					
		9	40,24					
		10	36,44					
		11	40,87	38,62	2,77	7,18%		
		12	35,06					
		13	41,96					
		14	37,15					

Concreto	Idade (dias)	n° CP	Eci (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C2	56	15	37,98	37,05	1,00	2,71%
		16	36,70			
		17	37,85			
		18	37,59			
		19	37,33			
		20	35,05			
		21	36,82			
C3	14	1	--	36,68	2,19	5,97%
		2	37,98			
		3	39,69			
		4	35,75			
		5	37,44			
		6	33,33			
		7	35,91			
	28	8	--	39,99	2,40	6,01%
		9	38,91			
		10	38,31			
		11	42,74			
		12	*27,4			
		13	*26,95			
		14	*27,2			
56	15	40,1	41,29	0,94	2,27%	
	16	40,52				
	17	42,42				
	18	41,29				
	19	41,42				
	20	40,52				
	21	42,75				
C4	14	1	--	36,07	1,73	4,80%
		2	36,98			
		3	36,28			
		4	32,67			
		5	37,46			
		6	36,16			
		7	36,86			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	Eci (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C4	28	8	34,21	36,39	1,14	3,14%
		9	37,14			
		10	37,9			
		11	35,71			
		12	36,83			
		13	36,11			
		14	34,67			
	56	15	38,36	36,98	0,85	2,29%
		16	36,87			
		17	36,8			
		18	37,37			
		19	38,36			
		20	35,8			
		21	36,68			
C5	14	1	37,68	35,57	2,42	6,80%
		2	30,44			
		3	36,72			
		4	36,41			
		5	36,62			
		6	35,04			
		7	36,11			
	28	8	35,28	36,76	2,84	7,72%
		9	34,94			
		10	32,29			
		11	38,36			
		12	38,98			
		13	39,73			
		14	37,76			
56	15	39,07	37,95	1,35	3,55%	
	16	39,79				
	17	37,02				
	18	37,38				
	19	37,65				
	20	38,79				
	21	35,98				

Fonte: O autor (2020)

* Valor excluído para o cálculo da média

Tabela A 3 - Valores individuais de módulo de Elasticidade dinâmico de cada CP

Concreto	Idade (dias)	n° CP	E _d (GPa)	Média final (GPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C1	14	1	41,81	40,53	0,77	1,91%
		2	39,49			
		3	40,46			
		4	41,12			
		5	40,66			
		6	39,88			
		7	40,28			
	28	8	41,55	41,77	0,53	1,26%
		9	41,44			
		10	41,70			
		11	41,78			
		12	41,77			
		13	41,25			
		14	42,88			
	56	15	43,35	43,02	0,51	1,18%
		16	42,68			
		17	42,80			
		18	43,49			
		19	42,71			
		20	43,75			
		21	42,35			
C2	14	1	42,87	43,18	0,48	1,10%
		2	43,11			
		3	43,68			
		4	42,96			
		5	43,33			
		6	43,85			
		7	42,48			
	28	8	44,39	44,85	0,36	0,80%
		9	44,66			
		10	44,53			
		11	45,06			
		12	44,78			
		13	45,38			
		14	45,17			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	E _d (GPa)	Média final (GPa)	Desvio Padrão	C.V (%)
C2	56	15	44,58	44,82	1,03	2,30%
		16	42,92			
		17	45,10			
		18	44,65			
		19	46,23			
		20	44,64			
		21	45,60			
C3	14	1	43,04	44,00	0,53	1,21%
		2	44,19			
		3	44,35			
		4	43,48			
		5	44,43			
		6	44,13			
		7	44,36			
	28	8	44,48	45,37	0,59	1,30%
		9	45,53			
		10	45,95			
		11	45,36			
		12	45,93			
		13	44,66			
		14	45,70			
56	15	46,31	46,67	0,84	1,80%	
	16	44,92				
	17	47,11				
	18	47,31				
	19	47,12				
	20	46,77				
	21	47,14				
C4	14	1	44,29	44,62	0,59	1,33%
		2	45,93			
		3	44,49			
		4	44,56			
		5	44,42			
		6	44,20			
		7	44,43			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	E _d (GPa)	Média final (GPa)	Desvio Padrão	C.V (%)	
C4	28	8	45,62	45,03	0,35	0,78%	
		9	45,10				
		10	44,95				
		11	45,16				
		12	44,88				
		13	44,44				
		14	45,06				
	56	15	45,45	46,24	0,55	1,19%	
		16	46,22				
		17	45,89				
		18	45,89				
		19	46,89				
		20	46,41				
		21	46,95				
	C5	14	1	44,92	45,00	0,80	1,77%
			2	46,41			
			3	44,99			
			4	43,82			
			5	45,38			
			6	44,48			
			7	45,04			
28		8	45,84	45,46	0,55	1,20%	
		9	44,80				
		10	44,59				
		11	45,83				
		12	45,45				
		13	45,90				
		14	45,82				
56		15	46,69	47,08	0,77	1,63%	
		16	47,04				
		17	47,64				
		18	46,81				
		19	47,63				
		20	48,02				
		21	45,73				

Fonte: O autor (2020)

Tabela A 4 - Valores individuais de VPU de cada CP por idade

Concreto	Idade (dias)	n° CP	VPU (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão	C.V (%)
C1	14	1	4555,75	4562,18	19,38	0,42%
		2	4585,50			
		3	4559,50			
		4	4581,75			
		5	4574,50			
		6	4544,75			
		7	4533,50			
	28	8	4624,75	4649,96	43,08	0,93%
		9	4641,25			
		10	4631,50			
		11	4691,25			
		12	4631,00			
		13	4603,50			
		14	4726,50			
	56	15	4747,50	4762,50	40,86	0,86%
		16	4696,00			
		17	4815,00			
		18	4758,00			
		19	4788,50			
		20	4797,00			
		21	4735,50			
C2	14	1	4744,50	4729,43	46,78	0,99%
		2	4722,00			
		3	4804,50			
		4	4701,25			
		5	4687,25			
		6	4771,00			
		7	4675,50			
	28	8	4777,00	4869,71	98,76	2,03%
		9	4783,00			
		10	5014,75			
		11	4873,00			
		12	4828,00			
		13	4814,00			
		14	4998,25			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	VPU (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão	C.V (%)
C2	56	15	4890,00	4910,86	34,96	0,71%
		16	4898,00			
		17	4890,00			
		18	4882,00			
		19	4893,00			
		20	4958,50			
		21	4964,50			
C3	14	1	4716,00	4765,46	39,51	0,83%
		2	4780,00			
		3	4762,25			
		4	4741,25			
		5	4731,25			
		6	4802,00			
		7	4825,50			
	28	8	4771,75	4854,64	60,04	1,24%
		9	4768,75			
		10	4879,00			
		11	4910,25			
		12	4908,75			
		13	4881,00			
		14	4863,00			
56	15	4952,25	4971,71	25,98	0,52%	
	16	4950,25				
	17	5013,00				
	18	4995,75				
	19	4954,75				
	20	4950,50				
	21	4985,50				
C4	14	1	4804,75	4801,61	22,54	0,47%
		2	4804,75			
		3	4806,00			
		4	4756,75			
		5	4801,00			
		6	4805,00			
		7	4833,00			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	VPU (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão	C.V (%)	
C4	28	8	4887,00	4848,36	39,51	0,81%	
		9	4893,50				
		10	4799,50				
		11	4859,50				
		12	4870,00				
		13	4797,75				
		14	4831,25				
	56	15	4814,50	4870,61	48,49	1,00%	
		16	4858,00				
		17	4798,25				
		18	4911,25				
		19	4923,25				
		20	4895,00				
		21	4894,00				
	C5	14	1	4743,50	4802,75	54,11	1,13%
			2	4745,00			
			3	4857,25			
			4	4780,25			
			5	4826,50			
			6	4864,00			
			7	*4731,5			
28		8	4811,00	4840,68	55,31	1,14%	
		9	4910,00				
		10	4834,25				
		11	4780,00				
		12	4782,25				
		13	4914,00				
		14	4853,25				
56		15	4947,75	4887,61	44,90	0,92%	
		16	4888,25				
		17	4826,00				
		18	4926,00				
		19	4870,25				
		20	4840,75				
		21	4914,25				

Fonte: O autor (2020)

* Valor excluído para o cálculo da média

Tabela A 5 - Valores individuais de IE de cada CP por idade

Concreto	Idade (dias)	n° CP	IE	Média	Desvio Padrão	C.V (%)				
C1	14	1	26	29	1,25	4,27%				
		2	-							
		3	-							
		4	31							
		5	29							
		6	31							
		7	30							
	28	8	29	30	1,11	3,72%				
		9	29							
		10	30							
		11	28							
		12	30							
		13	31							
		14	31							
		56	15				30	31	0,67	2,18%
			16				30			
			17				31			
			18				31			
			19				31			
			20				31			
			21				30			
C2	14	1	30	32	1,47	4,60%				
		2	30							
		3	35							
		4	31							
		5	33							
		6	32							
		7	32							
	28	8	33	33	0,52	1,54%				
		9	34							
		10	34							
		11	33							
		12	34							
		13	33							
		14	34							

Concreto	Idade (dias)	n° CP	IE	Média	Desvio Padrão	C.V (%)
C2	56	15	35	35	0,76	2,16%
		16	36			
		17	35			
		18	35			
		19	34			
		20	36			
		21	34			
C3	14	1	32	32	1,47	4,55%
		2	30			
		3	35			
		4	31			
		5	34			
		6	32			
		7	32			
C3	28	8	33	33	1,60	4,85%
		9	33			
		10	32			
		11	33			
		12	33			
		13	33			
		14	34			
C3	56	15	35	35	1,33	3,83%
		16	35			
		17	34			
		18	36			
		19	35			
		20	34			
		21	34			
C4	14	1	36	35	0,84	2,37%
		2	36			
		3	34			
		4	36			
		5	35			
		6	35			
		7	35			

Concreto	Idade (dias)	n° CP	IE	Média	Desvio Padrão	C.V (%)	
C4	28	8	39	38	0,92	2,43%	
		9	38				
		10	38				
		11	38				
		12	39				
		13	36				
		14	37				
	56	15	37	38	0,73	1,94%	
		16	38				
		17	37				
		18	39				
		19	37				
		20	38				
		21	39				
	C5	14	1	36	36	0,62	1,70%
			2	36			
			3	36			
			4	36			
			5	37			
			6	36			
			7	37			
28		8	41	41	0,73	1,80%	
		9	41				
		10	39				
		11	41				
		12	41				
		13	41				
		14	41				
56	15	42	41	1,09	2,66%		
	16	39					
	17	41					
	18	41					
	19	40					
	20	42					
	21	40					

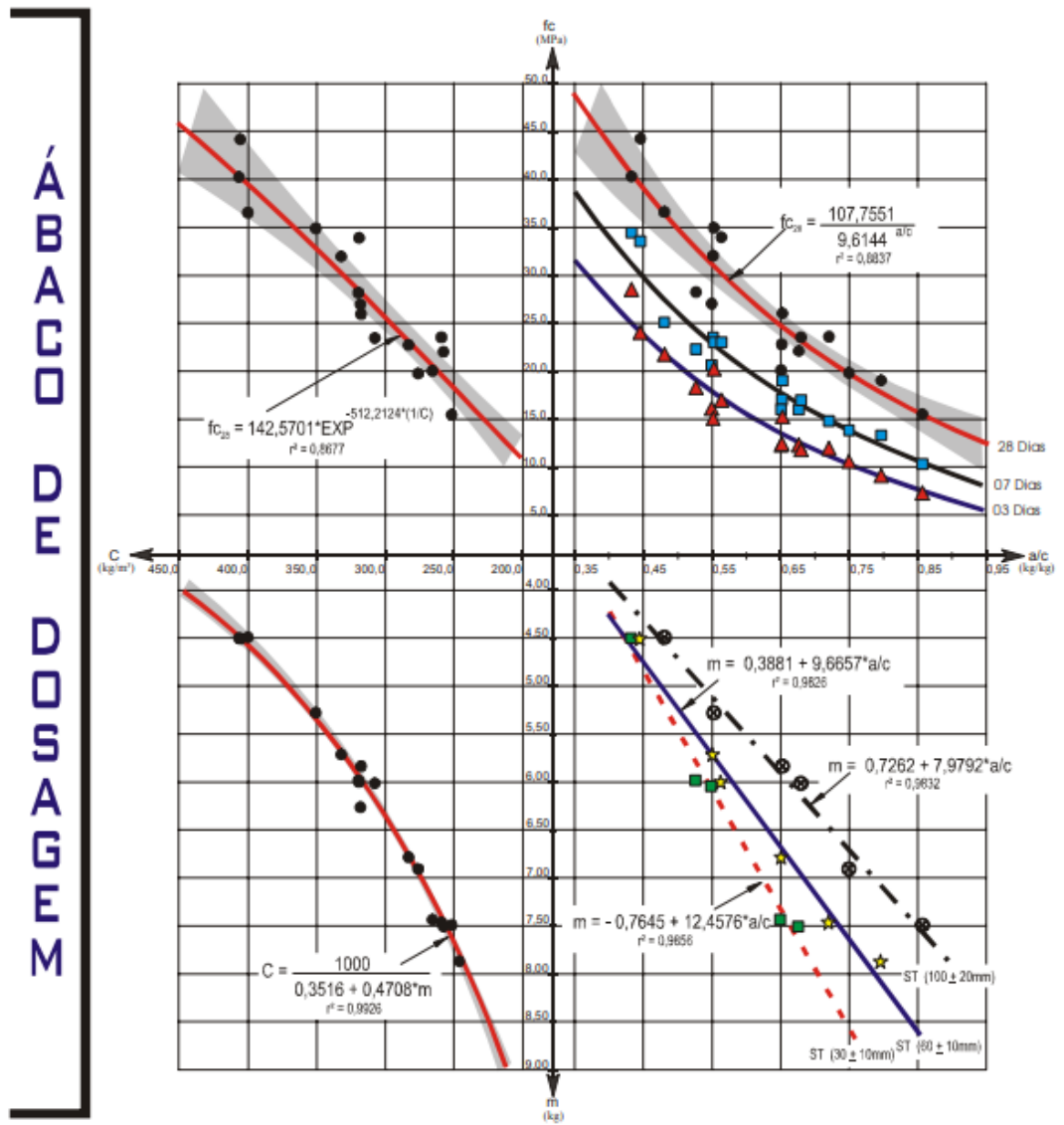
Fonte: O autor (2020)

* Valor excluído para o cálculo da média

APÊNDICE B

ÁBACO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS CONVENCIONAIS

AGREGADOS UTILIZADOS		TIPO DE CONCRETO CONCRETO CONVENCIONAL	ABATIMENTO (S.T.)(mm)	TEOR DE ARGAMASSA
Areia lavada, Natural, quartzosa	Pedra Britada de Basalto		30 ± 10	Q = 52%
FINA	BRITA 1		60 ± 10	Q = 51%
			100 ± 20	Q = 51%



OBSERVAÇÕES

1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

MATERIAL	Massa Específica (g (kg/dm³))	Diâmetro Máximo Característico (f...)(mm)	Módulo de Finura (MF)
- Cimento Portland (CP II-2-32 / Votoran)	3,090	-	-
- Areia lavada, FINA	2,634	2,4	2,000
- Pedra britada - BRITA 1	2,859	19,0	7,000

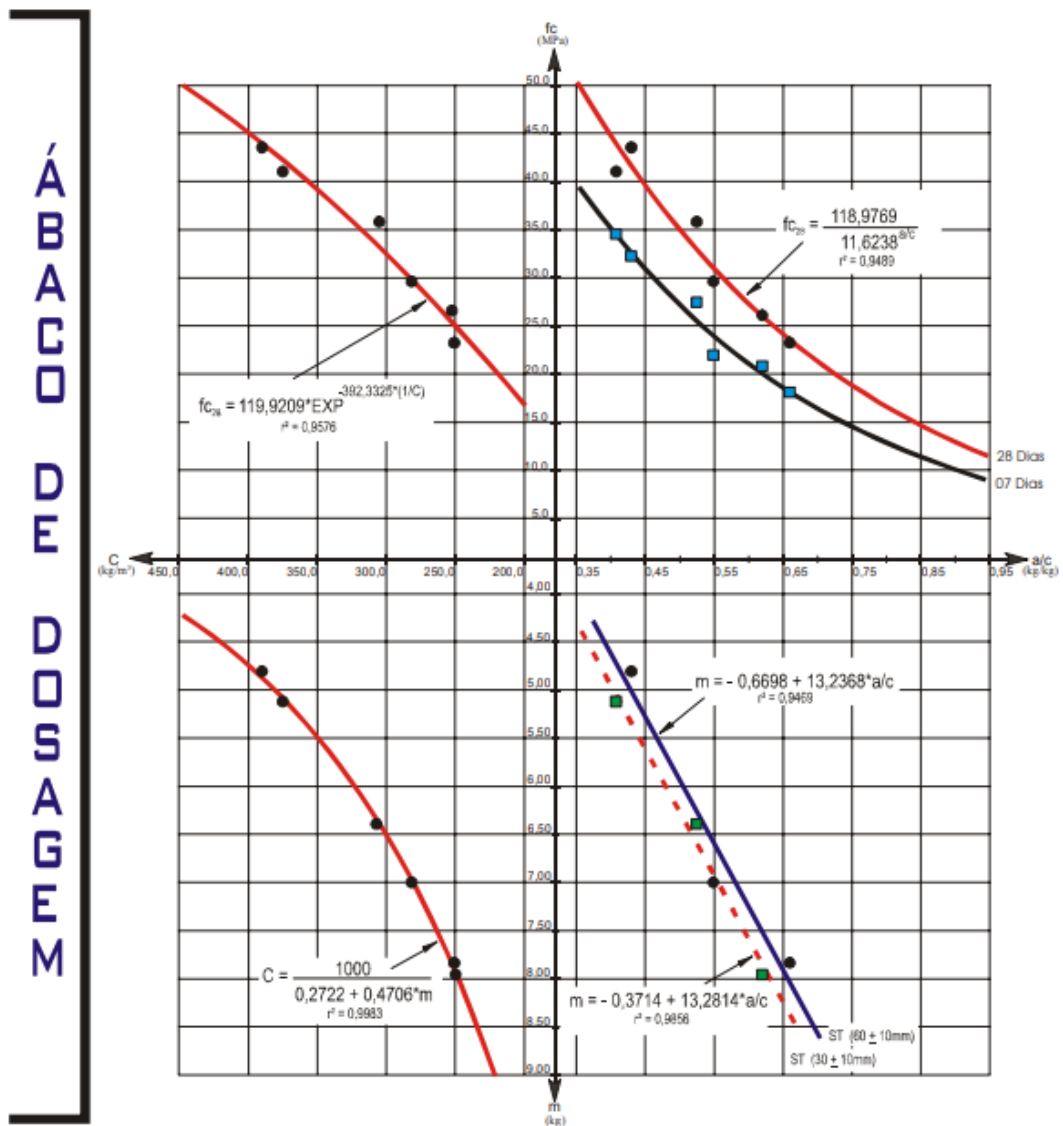
2 - Informações adicionais sobre este ábaco, podem ser obtidas nas tabelas A1-1 a A1-3 do ANEXO nº 1

QUADRO LEGENDA

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	ABATIMENTO MEDIDO PELO TRONCO DE CONE (ST)
03 Dias de idade	ST 30±10mm
07 Dias de idade	ST 60±10mm
28 Dias de idade	ST 100±20mm
	ST 100±20mm

ÁBACO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS ADITIVADOS

AGREGADOS UTILIZADOS		TIPO DE CONCRETO	ABATIMENTO (S.T.)(mm)	TEOR DE ARGAMASSA
Areia lavada, Natural, quartzosa	Pedra Britada de Basalto	CONCRETO ADITIVADO	30 ± 10	Q = 50%
MÉDIA	BRITA 1	Aditivo Plastificante do tipo "P" <small>Marca: CEMIX Fabric.: OTTO BAUMGART S.A.</small>	60 ± 10	Q = 50%



OBSERVAÇÕES

1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS

MATERIAL	Massa Específica (g (kg/dm³))	Diâmetro Máximo Característico(ϕ_{max}) (mm)	Módulo de Finura (MF)
- Cimento Portland (CP II-Z-32 / Votoran)	3,090	-	-
- Areia lavada, MÉDIA	2,642	2,4	2,690
- Pedra britada - BRITA 1	2,859	19,0	7,000

- 2 - Informações adicionais sobre este ábaco, podem ser obtidas nas tabelas A1-10 e A1-11 do ANEXO nº 1
 3 - A dosagem do aditivo plastificante do tipo "P" foi a recomendada pela fabricante (0,3% da massa do cimento)

QUADRO LEGENDA

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	ABATIMENTO MEDIDO PELO TRONCO DE CONE (ST)
● 07 Dias de idade	■ ST 30 ± 10mm
● 28 Dias de idade	● ST 60 ± 10mm

Fonte: Assunção (2002)