



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL



**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO VIA ENSAIOS  
NÃO DESTRUTIVOS: estudo comparativo**

Beatriz Menezes Santos

Belo Horizonte

2021

Beatriz Menezes Santos

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO VIA ENSAIOS  
NÃO DESTRUTIVOS: estudo comparativo**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Paulino Aguilar

Belo Horizonte

2021

S237a	<p>Santos, Beatriz Menezes.  Avaliação da resistência à compressão do concreto via ensaios não destrutivos [recurso eletrônico] : estudo comparativo / Beatriz Menezes Santos. – 2021.  1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Eduardo Chahud.  Coorientadora: Maria Teresa Paulino Aguiar.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 117-126.  Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil – Teses. 2. Materiais de construção – Durabilidade – Teses. 3. Resistência de materiais – Teses. 4. Testes não-destrutivos – Teses. 5. Concreto – Testes – Teses. 6. Concreto – Durabilidade – Teses. 7. Metacaulim – Teses. I. Chahud, Eduardo. II. Aguiar, Maria Teresa Paulino. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
	CDU: 691(043)

**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL DA ALUNA BEATRIZ MENEZES SANTOS.**

Às quatorze horas do dia vinte e seis de maio de dois mil e vinte e um, reuniu-se, por meio de sistema de interação de áudio e vídeo em tempo real (plataforma Google Meet) a Comissão Examinadora de Dissertação de Mestrado, aprovada *ad referendum* pelo Decano do Colegiado do Curso de Mestrado em Construção Civil - EE.UFMG, **Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior**, para julgar, em exame final, o trabalho intitulado “**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO VIA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: ESTUDO COMPARATIVO**”, requisito final para a obtenção do Grau de MESTRE EM CONSTRUÇÃO CIVIL na área de: TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Eduardo Chahud** após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra à candidata para apresentação do seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, sem a participação da candidata na transmissão, houve o julgamento e expedição do resultado pela Comissão. Foram atribuídas as seguintes indicações:

<b>PROF. EDUARDO CHAHUD</b>	(X) APROVADA (	) REPROVADA
<b>PROFA. MARIA TERESA PAULINO AGULAR</b>	(X) APROVADA (	) REPROVADA
<b>PROF. FRANCISCO ANTÔNIO ROCCO LAHR</b>	(X) APROVADA (	) REPROVADA
<b>PROF. ANDRÉ LUIS CHRISTOFORO</b>	(X) APROVADA (	) REPROVADA

Pelas indicações dos membros acima, a candidata foi considerada **aprovada**. Caso tenham sido sugeridas correções no trabalho, conforme pareceres anexos, a candidata terá o prazo máximo de 60 (sessenta) dias para efetuá-las e entregar a versão final da dissertação à Secretaria do Curso de Mestrado em Construção Civil. O resultado foi comunicado a candidata pela Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, a Presidente encerrou a transmissão e lavrou a presente ATA, que será assinada eletronicamente por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, vinte e seis de maio de dois mil e vinte e um.

Assinaturas:






**Obs.: Este documento não terá validade sem a assinatura e carimbo da Coordenação do Curso de Mestrado em Construção Civil.**

Eduardo  
Chahud:0500694680  
6

Assinado de forma digital por  
Eduardo Chahud.05006946806  
Dados: 2021.06.09 06:36:46  
-03'00'

**Prof. Dr. Eduardo Chahud**  
Coordenador do Curso de Mestrado em Construção Civil  
ESCOLA DE ENGENHARIA/UFMG

Dedico este trabalho ao Antônio e ao Bento. Que lhes sirva de inspiração para que, muito em breve, se apaixonem pelas descobertas e contribuam com a evolução da  
Ciência.

## AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho não teria sido possível sem a dedicação de pessoas que estiveram ao meu lado e o apoio de instituições neste percurso.

Da vida:

Agradeço ao meu esposo Rafael pelo amor a mim dedicado, companheirismo e suporte em todos os momentos. Aos meus filhos Bento e Antônio, por conviverem com a minha ausência, meu nervosismo e ansiedade. Ao Bento ainda mais, por participar comigo, em meu ventre, de grande parte das aulas e práticas de laboratório. Ao meu núcleo familiar (Júlio, Fernanda, Renée, Jakson, Jacque, Lô, Vivi e Rosana), pelo incentivo e apoio com as crianças nas minhas idas à BH. À Fernanda também pela hospitalidade e ajuda nos primeiros ensaios. Em especial à minha mãe Maria Ângela, principal incentivadora nos caminhos científicos, desde criança, que mesmo com poucos recursos me proporcionava materiais para experimentos incríveis.

Da UFMG:

Agradeço à Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Teresa pelo acolhimento, pela amizade, mentoria e pelas maravilhosas aulas de Práxis Científica que mudaram o meu jeito de ver a Ciência e a vida. Você não imagina o quanto a admiro e me espelho em você.

Ao Prof. Dr. Chahud também pela acolhida, pela disponibilidade e pelos conhecimentos passados, sobretudo quanto à prática dos ensaios e por promover a junção da ciência acadêmica com a realidade das construções.

Ao Prof. Dr. Luiz Melgaço, pelos ensinamentos, pelas aulas de experimentação, pelo incentivo e por doar seu tempo e esforço em me auxiliar com o equipamento de ultrassom nas minhas aventuras de idas e vindas para buscá-lo na FUMEC.

Ao Prof. Dr. Paulo Andery, por ter sido o primeiro professor quem me recebeu e me fez sentir em casa na UFMG, me possibilitando acesso, como orientanda, aos professores Chahud e Teresa.

Aos queridos mestres da época do Izabela Hendrix, Patrícia Barbosa e Silvio Xavier, pelo incentivo e orientações, também por ensinamentos e apoio que levarei por toda vida. Vocês são uma grande inspiração.

À Sarah, pela amizade e por ter doado tanto tempo seu em me ajudar, escutar e ensinar. Que grandiosa pesquisadora você é!

Também à Josiane e Juliana, pelas ajudas laboratoriais, aprendizados e disponibilidade em compartilhar do dia a dia como mestrandas.

Ao Heron e ao Laboratório de Estruturas da UFMG, que me auxiliaram nos ensaios de resistência à compressão.

À UFMG, aos demais profissionais e colegas do DEMC, principalmente os professores com os quais pude conviver e aprender informações valiosas da engenharia.

Por fim, e não menos importante, a Deus, à NSa. Senhora e à Irmã Benigna, que me fortaleceram, guiaram, protegeram pelos caminhos da BR 262, me livrando várias vezes de perigos, e que colocaram todas as pessoas citadas acima, bem como outras não citadas e que de certa forma contribuíram com a realização de mais uma etapa acadêmica. Sigo pedindo proteção, saúde e força, não só a mim, mas a todos os que estão em minha vida. Obrigada!

## RESUMO

A resistência à compressão do concreto é uma das propriedades físicas mais importantes e estudadas em todo o mundo devido ao fato de ser uma característica que apresenta a qualidade portante da peça concretada e está diretamente relacionada à segurança estrutural e a durabilidade de uma estrutura. A evolução desta propriedade inicia com os primeiros cristais formados pela ativação do cimento em contato com a água e vai até a completude da formação dos cristais de hidratação na matriz do concreto. É influenciada por diversos fatores, sobretudo pelo traço do concreto, seus materiais constituintes e a condição de cura. De forma a acompanhar se este desenvolvimento está acontecendo conforme projetado, existe o ensaio de rompimento por compressão axial, no Brasil preconizado pela NBR 5.739. Trata-se de um ensaio destrutivo, pois as amostras, levadas à fadiga, não podem mais ser utilizadas após o teste. Ao mesmo tempo, as investigações sobre a qualidade dos concretos, vinculadas a outras características, como por exemplo a sua resistividade elétrica ou porosidade, têm sido realizadas por meio de ensaios não destrutivos, que trazem resultados indicativos do desenvolvimento destas propriedades. O resultado destes ensaios pode trazer à conclusão do desenvolvimento da resistência à compressão, pois as características investigadas muitas vezes estão ligadas à formação dos cristais de hidratação ou à qualidade da microestrutura do concreto. Esta dissertação apresenta os resultados de uma pesquisa de natureza experimental acerca do desenvolvimento da resistência à compressão de dois tipos de concretos, em suas primeiras idades. Um concreto foi fabricado com cimento CPV e outro com substituição parcial em 20% do cimento CPV, em peso, por metacaulim. Os concretos estiveram em cura úmida e foram testados nas idades 12 e 24 horas, 7, 14 e 28 dias pós moldagem. Foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistividade elétrica superficial e volumétrica, módulo de elasticidade frequência ressonante, ultrassom e esclerometria. Os dados obtidos foram confrontados com a literatura específica de cada método de ensaio e também buscou-se correlacionar os resultados dos ensaios não destrutivos com o ensaio de resistência à compressão, de forma a observar a existência de correlação entre eles. Observou-se que os dois tipos de concreto desenvolveram a resistência à compressão de forma semelhante, com valores muito próximos, e que o metacaulim não teve grande influência sobre os resultados nesta porcentagem de material utilizada, exceto nos resultados de resistividade elétrica, onde o concreto com metacaulim apresentou-se 400 vezes maior que o concreto de referência aos 28 dias. Nos demais ensaios, tamanha diferença não foi observada. As correlações propostas entre o ensaio de resistência à compressão e os ensaios de resistividade elétrica, ultrassom e esclerometria demonstraram-se fortes, foram definidas equações que melhor se ajustaram a cada tipo de ensaio para os concretos estudados, contudo não foi evidenciado forte correlação entre o ensaio de resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico, indicando que o desenvolvimento do módulo de elasticidade não acontece de forma semelhante ao de resistência à compressão.

**Palavras-chave:** Concreto; Metacaulim; Ensaios não destrutivos; Resistência à compressão.

## ABSTRACT

*The compressive strength of concrete is one of the most important and studied physical property worldwide, due to the fact that it is a characteristic that presents the bearing quality of the concrete part and is directly related to the structural safety and durability of a structure. The evolution of this property starts with the first crystals formed by the activation of the cement in contact with the water and goes until the completion of the formation of the hydration crystals in the concrete matrix. It is influenced by several factors, mainly by the design of the concrete mix, its constituent materials and the curing condition. In order to monitor whether this development is happening as projected, there is a rupture test by axial compression, in Brazil recommended by NBR 5.739. It is a destructive test, because the samples, taken to fatigue, can no longer be used after the test. At the same time, investigations about the quality of concretes, linked to other characteristics, such as their electrical resistivity or porosity, have been carried out through non-destructive tests, which bring indicative results of the development of these properties. The test results can bring to a conclusion the development of the compressive strength, as the investigated characteristics are often linked to the formation of hydration crystals or to the quality of the concrete microstructure. This dissertation presents the conclusions obtained from an experimental research about the development of the compressive strength of two types of concretes, in their early ages. One concrete was manufactured with CPV cement and the other with partial replacement in 20% of the cement by weight with metakaolin. The concretes were wet cured and tested at ages 12 and 24 hours, 7, 14 and 28 days after molding. Tests of axial compressive strength, superficial and volumetric electrical resistivity, elastic modulus of resonant frequency, ultrasound and sclerometry were performed. The data obtained were compared with the specific literature of each test method and it was also sought to correlate the results of the non-destructive tests with the compressive strength test in order to observe the existence of correlation between them. It was observed that the two types of concrete developed the compressive strength in a similar way, with very close values, and that the metakaolin did not have a great influence on the results in this percentage of material used, except in the results of electrical resistivity, where the concrete with metakaolin it was 400 times greater than the reference concrete at 28 days. In the other trials, such a difference was not observed. The correlations proposed between the compressive strength test and the electrical resistivity, ultrasound and sclerometry tests proved to be strong, equations were defined that best fit each type of test for the studied concretes, however there was no strong correlation between the compressive strength test and the dynamic modulus of elasticity, indicating that the development of the modulus of elasticity does not happen in a similar way to that of compressive strength.*

**Keywords:** Concrete; Metakaolin; Non-destructive tests; Compressive strength.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fatores de influência no resultado de um ensaio de compressão axial. ...	34
Figura 2 - Curva de Abrams, correlação entre resistência e relação água/cimento. .	34
Figura 3 - Esquema de Wenner para mensurar a resistividade superficial do concreto. .....	43
Figura 4 - Influência da quantidade de água nos poros do concreto na resistividade superficial. ....	44
Figura 5 - Esquema de montagem do corpo de prova para o ensaio de resistividade volumétrica. ....	46
Figura 6 - Esquema demonstrando o aparato desenvolvido Lamounier et al. (2014) para execução do ensaio de resistividade volumétrica. ....	47
Figura 7 - Diagrama tensão x deformação do concreto para compressão simples. ...	51
Figura 8 - Curva comparativa do ensaio de Esclerometria.....	61
Figura 9 - Etapas do trabalho experimental.....	63
Figura 10 - Corpos de prova recém moldados. ....	66
Figura 11 - Aparelhagem para a medição da resistividade elétrica do concreto: .....	70
Figura 12 - Sistema de medição de resistividade volumétrica por chapas de cobre e eletrodos utilizado no laboratório de Materiais de Construção da UFMG.....	71
Figura 13 - a) Esclerômetro Schmidt. b) Seção longitudinal do esclerômetro. ....	72
Figura 14 - Ensaio de esclerometria. ....	72
Figura 15 - Aparelho Pundit Lab - Proceq. ....	74
Figura 16 – Aparelho Erudite MKII para aplicação de frequência ressonante. ....	74
Figura 17 – a) matriz interna de um corpo de prova CM submetido à compressão axial, às 12h pós mistura. b) demais corpos de prova rompidos às 12 horas pós mistura. ...	77
Figura 18 - Pontos de metacaulim que não se misturaram ao concreto. Imagem de rompimento aos 14 dias pós moldagem. ....	78

Figura 19 - Resultados médios e amplitude de variação dos valores medidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial do concreto de referência (CR) e do concreto com metacaulim (CM). .....	79
Figura 20 - Resultados médios dos valores medidos nos ensaios de resistividade elétrica superficial do concreto de referência (CR) e do concreto com metacaulim (CM).....	81
Figura 21 - Resultados médios dos valores medidos nos ensaios de resistividade elétrica volumétrica do concreto de referência (CR) e do concreto com metacaulim (CM).....	84
Figura 22 - Resultados médios e amplitude de variação dos valores medidos nos ensaios de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada nas diferentes idades.....	86
Figura 23 - Resultados médios e amplitude de variação dos valores calculados do módulo de deformação tangente inicial com base nos resultados de resistência à compressão nas diferentes idades. ....	88
Figura 24 - Módulos de elasticidade estático e dinâmico em relação a velocidade de pulso ultrassônico.....	89
Figura 25 - Resultados médios e amplitude de variação dos valores de velocidade de propagação de pulso ultrassônico nas diferentes idades.....	90
Figura 26 - Resultados médios e amplitude de variação dos valores do índice esclerométrico Q nas diferentes idades.....	93
Figura 27 - Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades.....	98
Figura 28 - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e a resistividade elétrica volumétrica pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades. ....	100
Figura 29 - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e o módulo de elasticidade frequência ressonante forçada pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades. ....	102

Figura 30 - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e a velocidade de pulso ultrassônico pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades. ....	105
Figura 31 - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e o índice esclerométrico pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades. ....	107
Figura 32 – Correlação entre as resistências à compressão obtidas no ensaio de rompimento de corpos de prova versus resistência à compressão calculada pela Eq. 8 com base no índice esclerométrico nas diferentes idades. ....	110

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Probabilidade de corrosão por meio das leituras de resistividade elétrica ( $\Omega m$ ) .....	41
Tabela 2 - Relação entre resistividade superficial e risco de corrosão .....	45
Tabela 3 - Caracterização dos aglomerantes utilizados .....	64
Tabela 4 - Consumo de materiais por kg de cimento. ....	65
Tabela 5 - Corpos de prova e seus respectivos ensaios em idades distintas.....	68
Tabela 6 - Critérios de avaliação do concreto com base na VPU aos 28 dias .....	92
Tabela 7 - Abordagem convencional para interpretação do coeficiente de correlação. ....	97
Tabela 8 - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial com indicação de equação de melhor ajuste. ...	99
Tabela 9 - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica com indicação de equação de melhor ajuste	101
Tabela 10 - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade frequência ressonante com indicação de equação de melhor ajuste .....	104
Tabela 11 - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade frequência ressonante com indicação de equação de melhor ajuste .....	106
Tabela 12 - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e o índice esclerométrico com indicação de equação de melhor ajuste.....	109
Quadro 1 - Influência do metacaulim na evolução dos valores absolutos no intervalo de tempo entre ensaios.....	94
Quadro 2 - Confiabilidade das medições em relação à correlação dos valores nas idades medidas .....	95
Quadro 3 - Avaliação dos concretos quanto ao resultado indicativo da propriedade medida frente à literatura aos 28 dias.....	96

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/agl	Água/aglomerante
a/c	Água/cimento
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS EN	<i>British Standard</i>
C <sub>2</sub> S	Silicato dicálcico - notação química convencional do cimento
C <sub>3</sub> S	Silicato tricálcico - notação química convencional do cimento
Ca(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cálcio
Ca(OH) <sub>2</sub>	Teor de hidróxido de cálcio fixada
CaO	Óxido de Cálcio
CM	Concreto com substituição em massa por metacaulim
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Cálcio
CP	Cimento Portland
CP V, CP V ARI	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
CR	Concreto de referência
C-S-H	Silicato de Cálcio hidratado
DRX	Difração de Raio X
Eci	Módulo de elasticidade estático
Ed	Módulo de elasticidade dinâmico
Fc, Fck	Resistência à compressão característica do concreto
Fcj	Resistência à compressão característica do concreto em j dias
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
Fr	Frequência ressonante
GPa	Gigapascal
H	Hidrogênio
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
K <sub>2</sub> O	Óxido de Potássio
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MgO	Óxido de Magnésio
MPa	Megapascal

Na <sub>2</sub> O	Óxido de Sódio
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Norma Mercosul
PF	Perda por ignição, <i>Loss on Ignition</i>
Q	Índice esclerométrico
SiO <sub>2</sub>	Sílica ou quartzo
SO <sub>3</sub>	Óxido Sulfúrico
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titânio
UNE	Organismo de normalização espanhol
VPU, V	Velocidade de Pulso Ultrassônico em m/s
ρ <sub>s</sub>	Resistividade elétrica superficial em Ωm
ρ <sub>v</sub>	Resistividade elétrica volumétrica em Ωm

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 Objetivos .....	20
1.1.1 Objetivo geral.....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
1.2 Estrutura do trabalho.....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
2.1 O concreto: de fluido a pseudo-sólido e a sua habilidade de suportar cargas .....	22
2.2 Materiais aglomerantes de um concreto.....	25
2.2.1 Cimento Portland .....	25
2.2.2 Metacaulim.....	26
2.3 Propriedades do concreto no estado fresco .....	29
2.4 O ensaio de resistência à compressão axial .....	31
2.5 Os ensaios não destrutivos.....	35
2.5.1 Os ensaios não destrutivos e a resistência à compressão .....	37
2.6 A resistividade elétrica .....	39
2.6.1 Resistividade elétrica superficial .....	42
2.6.2 Resistividade volumétrica .....	45
2.7 O módulo de elasticidade.....	47
2.7.1 Módulo estático.....	51
2.7.2 Módulo dinâmico.....	53
2.8 A velocidade de pulso ultrassônico.....	55
2.9 A esclerometria .....	59
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>63</b>
3.1 Materiais.....	64
3.2 Métodos.....	64
3.2.1 Definição experimental do traço e execução do concreto .....	65
3.2.2 Propriedades no estado fresco.....	66
3.2.3 Moldagem e cura do concreto .....	66
3.2.4 Propriedades no estado endurecido.....	69
3.2.4.1 Resistência à compressão uniaxial .....	69
3.2.4.2 Ensaios não destrutivos.....	69

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>76</b>
4.1 Propriedade no estado fresco.....	76
4.2 Resistência à compressão uniaxial do concreto.....	78
4.3 Resistividade Elétrica.....	81
4.3.1 Resistividade elétrica superficial .....	81
4.3.2 Resistividade elétrica volumétrica .....	83
4.4 Módulo de elasticidade .....	85
4.4.1 Módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada.....	86
4.4.2 Módulo de elasticidade estático estimado.....	88
4.5 Determinação da Velocidade de Pulso Ultrassônica.....	90
4.6 Esclerometria .....	92
4.7 Análise qualitativa entre as grandezas medidas nos ensaios não destrutivos para os dois tipos de concreto .....	94
4.8 Correlação entre as grandezas obtidas nos ensaios não destrutivos e a resistência à compressão nas primeiras idades.....	97
4.8.1 Resistividades elétricas e a resistência à compressão.....	97
4.8.2 Módulo de elasticidade frequência ressonante forçada e a resistência à compressão.....	102
4.8.3 Velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão.....	105
4.8.4 Esclerometria e a resistência à compressão.....	107
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>112</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	113
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Concreto: senão um dos materiais mais utilizados na construção civil, certamente é um dos mais estudados. Indaga-se o motivo de tantas pesquisas publicadas: se é devido à grande possibilidade de variações em seus materiais constituintes, bem como as diferentes aplicações; se é devido à sua importância econômica; à sua importância social, pois por meio de estruturas feitas de concreto abrigam-se pessoas, empresas; ou ao seu impacto ambiental. Arisca-se a pressupor que o objetivo de tantos estudos se deve à importância que este compósito tem para a construção civil mundial e à necessidade de aprimoramento tecnológico diante das numerosas possibilidades que apresenta.

Em uma simples pesquisa na base de dados Portal de Periódicos da Capes, ao utilizar o termo “*concrete*” tem-se mais de um milhão artigos contendo este termo. No âmbito da avaliação da capacidade portante de uma estrutura em concreto busca-se, conjuntamente, o termo “*compressive strength*”, o qual tem-se 58 mil artigos. Diante desta infinidade literária, sobretudo tendo como ponto de partida de estudos mais recentes, vê-se a crescente utilização do termo “*non-destructive tests*” ou “*non-destructive exams*” nos artigos publicados da última década. Percebe-se que a maioria da literatura publicada nesta temática tem como objetivos a avaliação de concretos em seus diversos estados físicos e aplicações, ao desenvolvimento de concretos de melhor performance, com vistas à segurança estrutural, a durabilidade das estruturas e a sustentabilidade.

Desta mesma literatura, percebe-se também o grande número de publicações que tratam da substituição ou adição ao cimento Portland por materiais suplementares, na busca por melhorias em desempenho e durabilidade, tendo como destaque o uso de materiais que, dependendo da concentração de uso e da forma em que são inseridos em um concreto ora atuam como fíler, ora apresentam comportamento pozolânico, como o metacaulim (MEDEIROS; RAISDORFER; HOPPE FILHO, 2017; SANTOS; ALBUQUERQUE; RIBEIRO, 2020; ) ou a cinza de casca de arroz, por exemplo.

Além da possibilidade de melhoria nas propriedades do concreto, a contribuição ambiental é relevante nesta área de estudos, pois estes materiais suplementares, inicialmente tratados como resíduos, durante seu beneficiamento eliminam menor quantidade de gases poluentes se comparados aos eliminados durante a fabricação do cimento Portland (Garcia; Vargas; Castellanos, 2020).

Para que estes materiais suplementares possam ser utilizados faz-se necessário o constante desenvolvimento de pesquisas, com testagens em diferentes concentrações e aplicações. Para tanto, utilizar ensaios não destrutivos tem sido de grande auxílio nestas avaliações.

O crescente desenvolvimento de aparelhos portáteis e de bancada, que testem o concreto para avaliar melhor as suas propriedades bem como prever o seu funcionamento durante a vida útil, sem a necessidade de danificá-lo ou de criar corpos de prova apenas para serem ensaiados, e posteriormente descartados, como é feito nos ensaios tecnológicos consolidados, como exemplo o ensaio de resistência à compressão axial ou diametral, deve-se, sobretudo aos avanços na tecnologia experimental, na necessidade de levar aos canteiros de obra ensaios que, a princípio, somente seriam possíveis em laboratórios. Importante ressaltar que não é objetivo desses estudos a obsolescência dos ensaios consolidados, mas sim, utilizar os ensaios não destrutivos como auxílio ao estudo de um concreto. Além disso o uso de ensaios não destrutivos possibilita a repetição do ensaio na mesma amostra em caso de necessidade de contraprova, diferentemente dos ensaios destrutivos, onde a amostra não mais pode ser aproveitada.

A maioria dos ensaios não destrutivos não tem como objetivo a definição de propriedades mecânicas do concreto, mas sim, avaliar outros fatores como a porosidade, a predisposição a ataques químicos, a carbonatação, a rigidez, a identificação de manifestações patológicas, dentre outros. O ensaio de resistividade elétrica, por exemplo, é amplamente difundido no campo de estudos de corrosão do aço em concreto armado. O ensaio de esclerometria verifica a dureza superficial de uma peça concretada, e é bastante utilizado na indústria de pré-moldados, o ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante pode indicar quão elástico é aquele concreto ou detectar e medir fissuras, bem como a capacidade de flexão do concreto (ALMEIDA, 2015); por sua vez, o ensaio de ultrassom traz resultados indicativos de porosidade e a influência de microfissuras.

Contudo, é a partir destes resultados que é possível ter indicação de um concreto mais resistente, pois essas propriedades influenciam diretamente no comportamento mecânico. É devido a estes fatores que diversos estudos têm buscado correlacionar as propriedades mensuradas pelos ensaios não

destrutivos na tentativa de determinar valores de resistência à compressão. Hong et al. (2020) destacam que, em busca da segurança estrutural, aliar ensaios não destrutivos a testes para a estimativa da resistência à compressão de um concreto é válido não somente para controle de qualidade durante a fabricação e cura da peça estrutural como também durante a sua vida útil, para as etapas de manutenção.

Embora o número de pesquisas a respeito dos ensaios não destrutivos esteja crescente, muito ainda há de ser desenvolvido nesta temática, principalmente quanto à avaliação de concretos utilizando materiais alternativos em substituição ao cimento Portland. Importante destacar também que a maioria dos estudos anteriores (CASTELLOTE *et al.*, 2002; SPALVIER, HALL E POPOVICS, 2017; CABRAL; MONTEIRO; HELENE, 2014; SAJID *et al.*, 2018; ABDELOUAHEB *et al.*, 2016, dentre outros) conduziram testes não destrutivos a partir do vigésimo oitavo dia de idade. Poucos estudos avaliaram, com ensaios não destrutivos, concretos em idades como 24 horas ou 7 dias correlacionando os resultados à resistência à compressão do concreto, o que é urgentemente necessário, pois cada vez mais busca-se a desforma em idades precoces (termo dado pela norma norte-americana C 1074 (ASTM, 2017) – período desde a mistura até 28 dias) como, por exemplo, na metodologia construtiva de paredes de concreto, onde é prática comum a desforma com 24 horas pós moldagem dando início à sobrecarga de construção do pavimento superior.

Também poucos estudos correlacionaram mais de dois ensaios não destrutivos ao mesmo tempo e esta é uma prática que deveria ser incentivada, pois, por resultarem em dados indicativos das propriedades do concreto defende-se que quanto mais dados forem obtidos para o mesmo concreto melhor a sua avaliação global.

Diante dos fatos supracitados percebeu-se, então, a necessidade de contribuir com esta corrente de estudo, e este trabalho de pesquisa experimental buscou respostas às seguintes questões:

- 1) Os resultados dos diferentes ensaios não destrutivos evoluirão nas idades precoces de forma semelhante ao ensaio de resistência compressão axial para que possam ser correlacionados?
- 3) Concretos com traços diferentes, substituindo ou não o cimento por metacaulim, nas mesmas condições mistura e de cura, terão

desenvolvimento das propriedades de forma semelhante ao longo do tempo?

- 4) Especificamente ao caso deste estudo, qual seria o efeito no desenvolvimento da resistência à compressão se fosse substituído parte de um cimento Portland CPV ARI na mistura, por um material de comportamento pozolânico como o metacaulim?
- 5) É possível determinar a resistência à compressão pelo resultado direto dos ensaios não destrutivos? Seja graficamente ou por meio de equações?
- 6) Se sim, é possível estabelecer uma única equação para os diferentes tipos de concreto?
- 7) Caso seja possível determinar as resistências à compressão com ensaios não destrutivos, estes podem atuar isoladamente para tal fim (sem a necessidade da utilização do ensaio de resistência à compressão axial)?

Para tanto, escolheu-se nesse estudo desenvolver um concreto com cimento Portland CPV (concreto de referência, ou CR) e outro com as mesmas características de materiais constituintes e modo de fabricação do concreto CR, porém com a substituição do cimento CPV por 20% em peso por metacaulim (concreto CM). Buscou-se que ambos obtivessem aos 28 dias ( $F_{C28}$ ) o valor mínimo de 25 MPa bem como aferir os resultados de resistência à compressão em cada idade ( $F_{cj}$ ) testando o concreto em várias idades, utilizando o ensaio de resistência à compressão axial e os seguintes ensaios não destrutivos: resistividade elétrica superficial e volumétrica, esclerometria, módulo de elasticidade por frequência ressonante e ultrassom. Os testes ocorreram simultaneamente.

Por fim, buscou-se com este estudo a compreensão da importância e usabilidade dos ensaios não destrutivos. Em uma esfera laboratorial, os resultados deste estudo poderão nortear pesquisas futuras, instigando pesquisadores a utilizá-los cada vez mais em seus ramos de pesquisa. Extrapolando para os canteiros de obras haveria uma contribuição para o ganho de produtividade, pois alguns dos métodos são de fácil manuseio, podendo ser usados sem grandes dificuldades, possibilitando a aferição das propriedades do concreto *in loco* nas idades planejadas e liberando às demais etapas de obra.

Há também a possibilidade de monitoramento contínuo de determinado ponto da estrutura em prol da segurança estrutural. Além disso estima-se que há contribuição ambiental pela diminuição de geração de resíduos com corpos de prova, bem como de custos operacionais se comparados, por exemplo, com os ensaios de resistência à compressão via moldagem e rompimento de corpos de prova. Dessa forma, optar por ensaios não destrutivos é também uma forma de contribuir para a sustentabilidade do planeta.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar o desenvolvimento da resistência à compressão de dois concretos, um fabricado com cimento CPV e outro com substituição parcial do cimento CPV em 20% de peso por metacaulim, pelo uso de diferentes ensaios não destrutivos e pelo ensaio de resistência à compressão axial.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Medir o ganho de resistência à compressão em dois concretos, em diferentes idades, por meio de ensaios de resistência à compressão axial e ensaios não destrutivos: resistividade elétrica, esclerometria, módulo de elasticidade frequência ressonante e ultrassom;

- Determinar correlações matemáticas entre os valores de resistência à compressão axial dos concretos obtidos pelo rompimento de corpos de prova com os valores obtidos por meio dos ensaios não destrutivos;

- Comparar os resultados obtidos com valores publicados na literatura;

- Avaliar a possibilidade de uso dos diferentes ensaios não destrutivos com vistas a determinar a resistência à compressão de concretos.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é desenvolvido na seguinte estrutura:

No Capítulo 1 – Introdução, que contemplou as considerações iniciais, a justificativa e os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 será apresentado todo o estudo teórico que norteou o desenvolvimento dos ensaios bem como a análise pós ensaios, dentre os quais destacam-se: estudos que apresentem o uso dos ensaios não destrutivos e as particularidades de cada ensaio. Serão apresentadas também as características dos cimentos utilizados no experimento, suas particularidades, propriedades esperadas e o seu comportamento na mistura do concreto.

No Capítulo 3 serão apresentados os materiais e métodos, que englobam os materiais a serem utilizados, os equipamentos e as características físico-químicas dos materiais ensaiados.

O Capítulo 4 traz os resultados dos ensaios, sendo apresentados e discutidos inicialmente de forma individual, para em uma segunda parte, serem propostas as correlações entre os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e os ensaios não destrutivos. Há também a discussão com a literatura.

O Capítulo 5 apresenta conclusões obtidas e o Capítulo 6 as referências.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Apresenta-se, a seguir, os assuntos que norteiam este trabalho experimental com base em uma pesquisa teórica onde se complementam a literatura clássica e a literatura recente. São abordados os seguintes assuntos: concreto; o cimento Portland; o metacaulim; as propriedades de um concreto no estado fresco; o ensaio de resistência à compressão axial; a resistividade elétrica superficial e volumétrica; esclerometria; módulo de elasticidade estático e dinâmico por frequência ressonante e ultrassom.

### **2.1 O concreto: de fluido a pseudo-sólido e a sua habilidade de suportar cargas**

O concreto é definido pela norma norte-americana C 125 (ASTM, 2019) como um material essencialmente composto de um meio aglomerante no qual estão aglutinados partículas e fragmentos de agregados. No concreto de cimento hidráulico, o aglomerante é formado por meio de uma mistura de cimento e água. A sua qualidade é altamente condicionada à natureza mineral dos seus constituintes, da proporcionalidade empregada entre estes e do seu estado como produto final.

Até que o concreto se torne apto ao uso, diversas transformações químicas ocorrem durante o processo de cura, onde o mesmo passa do estado fresco para a condição de pseudo-sólido. A principal transformação ocorre devido à hidratação dos grãos de cimento que se encontram dispersos em meio aquoso. Conforme o avanço das reações químicas envolvidas neste processo, cristais de formatos e propriedades diversas são originados.

No decorrer do período de cura, estes cristais conectam-se aos agregados e conferem coesão ao concreto (LOTHENBACK; SCRIVENER; HOOTON, 2011). De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os produtos de hidratação formados passam a ocupar gradativamente os espaços anteriormente ocupados por água e ar, ocasionando na redução do tamanho e da quantidade de vazios.

A água e o ar que continuam presentes na estrutura solidificada do concreto exercem grande influência em suas propriedades, as quais estão incluídas as deformações sob as cargas, tanto a imediata como a lenta, e as deformações

independentes da ação de cargas como a retração hidráulica (SANTOS; HELENE, 2013). Além da presença da água e do ar, as características dos demais constituintes também influenciam diretamente nas propriedades dos concretos produzidos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o tipo de cimento a ser utilizado na produção do concreto tem um efeito direto na porosidade, e, conseqüentemente, na resistência mecânica e na durabilidade. Conforme discussão apresentada por Alvarenga (2018) e por Pelisser *et al.* (2018) o uso de cimentos compostos contendo materiais cimentícios suplementares como o metacaulim, a escória de alto forno e as cinzas volantes como adição mineral, em substituição parcial ao clínquer do cimento Portland ou em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concreto, é bastante difundido na indústria da construção civil, principalmente quando são requeridas condições específicas relacionadas à durabilidade.

Estes materiais, quando utilizados, provocam o refinamento da estrutura de poros da pasta de cimento e fornecem ao concreto uma matriz cimentícia mais densa conduzindo a melhorias nas propriedades. O metacaulim, por exemplo, é um material cimentício suplementar que apresenta finura superior em relação ao cimento Portland. Smallwood *et al.* (2003) afirmam que fisicamente, a densificação dos produtos de hidratação dentro da matriz ocorre em função deste fato.

Além disso, os materiais cimentícios suplementares são considerados ecoeficientes, pois são obtidos por meio de processos que envolvem menores emissões de poluentes para a atmosfera e requerem um baixo consumo de energia na sua produção. Tais materiais alternativos constituem uma linha de pesquisa relevante e muito estudada em todo o mundo.

Outro componente fundamental e que exerce grande influência nas propriedades do concreto são os agregados, estes, são classificados como graúdos ou miúdos pela NBR 7.211 (ABNT, 2009, p. 3), sendo, os agregados graúdos definidos como “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm” e os agregados miúdos como, “agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm”. Os agregados são considerados materiais inertes, ou seja,

que não reagem quimicamente com a água, e ocupam entre 60% e 80% do volume total do concreto.

A NBR 7.211 (ABNT, 2009) também delimita as diretrizes e os requisitos exigíveis para a recepção e produção de agregados destinados à fabricação de concretos de cimento Portland. A norma estabelece que os agregados devem ser formados por grãos de minerais duros, estáveis, limpos, duráveis e compactos, isentos de substâncias de natureza que afetem a hidratação e o endurecimento do cimento e que prejudiquem a suas propriedades.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que os agregados apresentam porosidade inferior à pasta cimentícia, assim como Almeida (2012) relata que os agregados apresentam resistência mecânica superior à resistência da pasta cimentícia que os envolve. Em observação à influência que as características físicas, além das características térmicas e químicas dos agregados, podem exercer no concreto a ser produzido, sendo possível afetar as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade e a durabilidade, presume-se que a escolha dos agregados deve ser realizada com critério (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Além das características isoladas de cada material empregado na produção do concreto, para que as propriedades requeridas sejam alcançadas, faz-se necessária atenção em relação às proporções entre os constituintes. Neste trabalho o estudo da dosagem do concreto, será tratado como *design* do concreto. Este estudo compreende a escolha dos agregados, a relação água/cimento e a necessidade ou não do uso de aditivos.

Todo o cuidado com o *design* do concreto está diretamente relacionado à obtenção da qualidade esperada durante o seu uso e uma das principais características esperadas é a capacidade de receber, absorver e transmitir cargas sem que ocorram danos estruturais que comprometam a sua segurança. Para comprovar se esta propriedade foi alcançada o ensaio de resistência à compressão axial é o principal utilizado. Outros ensaios como o de compressão diametral (flexão) e módulo de elasticidade complementam o diagnóstico.

## 2.2 Materiais aglomerantes de um concreto

A resistência mecânica do concreto, assim como, as propriedades físicas, podem ser consideravelmente afetadas pelo tipo de aglomerante utilizado na mistura, visto que, a pasta de cimento é considerada o constituinte ativo do concreto. Portanto, a escolha de um sistema de aglomerante apropriado é um dos principais aspectos envolvidos na obtenção do tipo de concreto que melhor resistirá às cargas especificadas em projeto e ao ambiente no qual estará sujeito.

Tendo em vista estes aspectos o conhecimento dos efeitos do tipo de cimento Portland sobre a química da solução de poros do concreto assume primordial importância (SCOTT; ALEXANDER, 2016). Além do tipo de aglomerante especificado, as características microestruturais condicionam-se à diversos fatores tais como o tipo e a quantidade de adições minerais, a temperatura, o período de hidratação e a relação água/cimento (BRIZOLA, 2007).

### 2.2.1 Cimento Portland

Apesar de o concreto ser um material utilizado pelos romanos, o desenvolvimento que se conhece foi obtido por meio da descoberta do cimento Portland no século XIX, patenteado por Joseph Aspdin, um construtor de Leeds, Reino Unido. Este material é composto de uma mistura de clínquer e sulfato de cálcio na proporção de cerca de 95%-5%. A produção do clínquer se dá por meio de calcinação a 1.450°C de uma mistura finamente moída e homogeneizada de calcário e argila na proporção de aproximadamente 80%-20% com a intenção de formar silicatos de cálcio, assim como aluminatos e ferroaluminato tetracálcico. Ao ser retirado do forno da fábrica de cimento, seguido de resfriamento rápido, os nódulos centimétricos duros obtidos são moídos conjuntamente ao sulfato de cálcio, resultando no cimento Portland. Os cimentos compostos são resultantes da mistura pós moagem, conjunta ou separada, do clínquer com outros constituintes minerais (NONAT, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), um processo de dissolução-precipitação nas primeiras fases seguido de um processo topoquímico constitui o mecanismo de hidratação do cimento, originando duas principais fases sólidas, o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>).

O C-S-H é um termo hifenizado significando que este não é um composto bem definido, sua composição química nas pastas de cimento em hidratação, varia conforme a relação água/cimento, a idade de hidratação e a temperatura, causando alternância na relação cálcio/sílica e no teor de água quimicamente combinada. O silicato de cálcio hidratado é a fase sólida mais relevante na determinação das propriedades, pois, constituem de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. Enquanto isso, o hidróxido de cálcio constitui de 20% a 25% do volume dos sólidos da pasta hidratada, sendo a sua quantidade afetada principalmente pelo espaço disponível na estrutura da pasta.

Cálculos estequiométricos mostram que a reação de hidratação do  $C_3S$  produz 61% de  $C_3S_2H_3$  e 39% de  $Ca(OH)_2$ , enquanto a hidratação do  $C_2S$  produz 82% de  $C_3S_2H_3$  e 18% de  $Ca(OH)_2$ . Em acréscimo, calcula-se a partir das equações estequiométrica que o  $C_3S$  e o  $C_2S$  necessitam de 24% e 21% de água, respectivamente, para a hidratação completa. As reações aproximadas podem ser descritas conforme Equações 1 e 2.



No Brasil existem diversos tipos de cimento Portland, sendo sua composição e desempenho estabelecidos pela norma NBR 16.697 (ABNT, 2018). Sendo estes, cimento Portland comum (CP I), cimento Portland de alta resistência inicial (CP V ARI), cimento Portland de alto forno (CP III), cimento Portland pozolânico (CP IV), cimento Portland resistente a sulfatos (CP IV - RS), cimento Portland branco (CPB) e cimento Portland com baixo calor de hidratação (BC). Estes são designados de acordo com tal tipologia, determinada pela presença, ou não, de adições ou propriedades especiais.

### 2.2.2 Metacaulim

Considerando o apelo ambiental envolvido na produção do cimento Portland, demais constituintes minerais passaram a ser considerados em substituição ao clínquer na produção deste material. Sabe-se que durante a produção do cimento Portland há uma emissão de 1 kg de  $CO_2$  na atmosfera por kg de clínquer. Sendo

que 30% desta quantidade é relativa à queima de combustíveis necessários ao processo de clínquerização e aproximadamente 70% relacionado ao processo de descarbonatação do calcário.

Tendo em vista o alto impacto ambiental que a produção deste material envolve, as fábricas de cimento têm utilizado combustíveis alternativos ao invés de combustíveis fósseis e, para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas ao processo de descarbonatação, uma das soluções foi a mencionada redução da quantidade de clínquer no cimento substituindo-o por compostos minerais mais ou menos reativos como o filer calcário, escória de alto-forno e por pozolanas, tais como as cinzas volantes e o metacaulim (NONAT, 2014; ABELLÁN-GARCÍA *et al.*, 2020).

As pozolanas são, geralmente, de natureza amorfa e com alto teor de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que reagem com o hidróxido de cálcio formado durante a hidratação do cimento Portland. Na produção de 1 tonelada de metacaulim ocorre a geração aproximada de 330 kg/tonelada de CO<sub>2</sub>, enquanto que, conforme mencionado anteriormente, os valores gerados na produção de cimento são bastante superiores (ABELLÁN-GARCÍA *et al.*, 2020).

O metacaulim é um material que passou a ser utilizado como substituto parcial do cimento Portland na produção de concreto, sobretudo em situações onde há a preocupação com a vida útil e durabilidade, especificamente por apresentar propriedades pozolânicas. De acordo com Abellán-García *et al.* (2020) o seu custo é um pouco mais elevado que o do cimento, contudo as melhorias conferidas aos concretos produzidos são notáveis. Trata-se de um material ultrafino, produzido pela desidroxilação de um precursor de caulim sob aquecimento na faixa de temperatura de 700 a 800°C (QUIAN, LI, 2000).

Abellán-García *et al.* (2020) realizaram a caracterização química do metacaulim e apuraram uma composição de 52,17% de SiO<sub>2</sub>, 39,11% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,78% de CaO, 0,07% de MgO, 0,22% de SO<sub>3</sub>, 0,61% de Na<sub>2</sub>O, 0,06% de K<sub>2</sub>O, 1,48% de TiO<sub>2</sub> e 2,69% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Devido ao alto teor de alumina em sua composição, o metacaulim, ao ser adicionado em uma pasta de cimento Portland, primeiramente reage com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento formando fases de aluminatos como o C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>, e o C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>. Ainda, por conter grande quantidade de sílica em sua composição, reage com o hidróxido

de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e produz C-S-H gel em temperatura ambiente (MALHOTRA, ZHANG, 1995).

A adição de metacaulim no cimento Portland na produção de concretos vem sendo largamente testada em diversos estudos, em diferentes teores de substituição ou adição. Observou-se contribuição desta substituição no ganho de resistência à compressão axial e na durabilidade dos concretos, em teores de substituição em torno de 15 a 20% (WILD *et al.*, 1996; NICHOLAS *et al.*, 2014; VANCE *et al.*, 2013; MUDULI e MUKHARJEE, 2019). Os autores afirmam que o ganho da resistência à compressão se deve, sobretudo, ao efeito fíler que o metacaulim concede à matriz cimentícia nas idades iniciais, à contribuição para a velocidade do processo de hidratação do cimento, seguido pelo efeito pozolânico em idades superiores.

Em contrapartida, há uma discussão entre os pesquisadores em relação à concentração, pois o metacaulim, por ser muito fino e possuir grande área específica (em torno de 12.000  $\text{m}^2/\text{kg}$  enquanto que o cimento Portland possui cerca de 363  $\text{m}^2/\text{kg}$  (WILD *et al.*, 1996), exige maior quantidade de água de amassamento, o que pode afetar características reológicas do concreto (QUIAN, LI, 2000; DINAKAR, 2011; WAGH *et al.*, 2020).

Li e Rangaraju (2016) realizaram estudos com este material e afirmaram que o aumento no teor de metacaulim resultou em uma diminuição significativa na trabalhabilidade, mas, conduziu à melhoria da resistência à compressão. Os referidos pesquisadores atribuíram este fato à alta reatividade do  $\text{SiO}_2$  e do  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , presentes no metacaulim em altos teores.

Assim como os resultados observados por Abellán-García *et al.* (2020), que ao conduzir estudos onde realizaram a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim em diferentes teores, constataram que, conforme o teor de substituição aumentava, mais reduzida se tornava a trabalhabilidade dos concretos produzidos. A alta reatividade do metacaulim no processo de hidratação, os altos teores de  $\text{SiO}_2$  e do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  amorfo e suas partículas não esféricas porosas foram as razões relatadas pelos autores para a diminuição da trabalhabilidade. Assim como, Li e Rangaraju (2016) e Abellán-García *et al.* (2020) demais pesquisadores concluíram que a incorporação parcial de metacaulim na produção de concretos faz necessário o uso de aditivos químicos que conferem plasticidade ou mais água na mistura para

garantir uma trabalhabilidade adequada. Em relação às duas opções, ou a utilização de mais água na mistura, ou o uso de aditivos químicos que conferem plasticidade, observou-se que a primeira opção conduz à um efeito positivo na trabalhabilidade, contudo, um efeito negativo na resistência mecânica do concreto. Em relação à segunda opção, o uso de aditivos químicos que conferem plasticidade tem um efeito positivo na trabalhabilidade sem prejudicar o desempenho mecânico. (KINUTHIA *et al.*, 2000; BROOKS e JOHARI, 2001; CASTELLANOS, 2014; FERDOSIAN *et al.*, 2017 e ARIZZI e CULTRONE, 2018).

Abellán-García *et al.* (2020), em suas pesquisas, constataram um aumento significativo na resistência à compressão nas primeiras idades à medida que o teor de substituição de cimento Portland por metacaulim aumentava. Os autores afirmam que este fato foi ocasionado devido à aceleração da hidratação do cimento Portland e pela reação pozolânica do metacaulim com o hidróxido de cálcio, fato este também constatado por Kinuthia *et al.* (2000) e Brooks e Johari (2001). Considerando os resultados apurados por Abellán-García *et al.* (2020) em suas pesquisas, em relação à resistência à compressão axial na idade de 28 dias, a inclusão de metacaulim proporcionou um leve efeito negativo nos resultados, sendo estes justificados pela diminuição, mesmo que sutil, na densidade de empacotamento do concreto.

### **2.3 Propriedades do concreto no estado fresco**

De acordo com Papo e Piani (2004) o estudo da reologia da pasta de cimento é necessário para fornecer uma ferramenta útil para o controle da produção de cimento e para obter mais informações sobre a química do cimento. Além disso, o conhecimento da reologia de pastas de cimento pode contribuir para uma melhor compreensão do comportamento de escoamento de argamassas e do concreto. As pastas de cimento são suspensões altamente concentradas; seu comportamento reológico é geralmente muito complexo, sendo condicionado a fatores de diferentes naturezas, tais como, fatores físicos (relação água/cimento, a forma e o tamanho do grão do cimento), fatores químicos e mineralógicos (a composição do cimento e suas modificações estruturais devido aos processos de hidratação), condições de mistura, condições de medição (instrumentos de medição e procedimentos experimentais), bem como a presença de aditivos.

O comportamento do concreto no estado fresco sofre alteração em decorrência da hidratação da pasta de cimento e conforme evolui para o estado endurecido. A tensão de escoamento, a viscosidade plástica e as características de fluxo são alguns parâmetros reológicos fundamentais que repercutem diretamente sobre a microestrutura da pasta no estado endurecido, e conseqüentemente, sobre a durabilidade das estruturas de concreto. Assim, o ensaio de consistência, pelo abatimento de tronco de cone (*slump test*), normatizado pela NBR 16.889 (ABNT, 2020), tem o intuito de verificar a trabalhabilidade das misturas no estado fresco. Trata-se de uma técnica de caracterização do concreto primordial para a identificação do seu comportamento durante o manuseio (HOPPE *et al.*, 2007).

O ensaio que determina a consistência do concreto pelo abatimento de tronco de cone, NBR 16.889 (ABNT, 2020), é executado no momento em que o concreto está sendo produzido. Consiste no preenchimento de um molde tronco-cônico, com dimensões padronizadas, em três camadas, cada uma destas com aproximadamente um terço da altura do molde. Ao realizar o preenchimento, deve-se adensar o concreto com o uso de haste de adensamento aplicando-se 25 golpes por camada. Na primeira camada, é necessário inclinar levemente a haste e efetuar, aproximadamente, metade dos golpes em forma de espiral até o centro. As demais camadas devem ser adensadas de forma que os golpes não atinjam as camadas anteriores. Posteriormente, faz-se a retirada do molde e realiza-se a mensuração da diferença de altura entre o molde e o tronco-cone formado pelo concreto. Este valor é então atribuído como valor de abatimento, um indicativo da trabalhabilidade e da qualidade do concreto fresco.

Hoppe *et al.* (2007) afirma que, com a retirada do molde, o concreto irá fluir em função da sua viscosidade aparente, sempre que seu peso próprio superar a tensão de escoamento, e irá parar de fluir quando a tensão por unidade de área se igualar a tensão de escoamento.

O índice de consistência dos concretos é profundamente afetado pelos materiais constituintes e pela relação água/cimento. Quanto mais porosas ou finas forem as partículas dos materiais empregados, maior será o consumo de água necessário para manter o concreto com uma trabalhabilidade adequada para o seu manuseio e lançamento. Em contrapartida, a adição desmedida de água nas

misturas conduz a perdas consideráveis no desempenho dos concretos produzidos. Deste modo, de acordo com o material a ser empregado na produção dos concretos, a indústria da construção civil recorre frequentemente ao uso de aditivos que atuam quimicamente na correção deste problema.

Diversos estudos vêm sendo conduzidos com a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim na produção de concretos. Contudo, o fato de o metacaulim apresentar finura superior ao cimento Portland ocasiona em um consumo maior da água disponível conduzindo à perda de trabalhabilidade da mistura sendo este fato observado recorrentemente na literatura (KINUTHIA *et al.*, 2000; BROOKS, JOHARI, 2001; CASTELLANOS, 2014; HADDADOU *et al.*, 2015; FERDOSIAN *et al.*, 2017; ARIZZI, CULTRONE, 2018; ABELLÁN-GARCÍA *et al.*, 2020). Assim, o uso de aditivos que atuam quimicamente pode ser avaliado, pois pode conduzir ao não prejuízo da trabalhabilidade dos concretos e, conforme observado na literatura consultada, não afetar o desempenho mecânico dos concretos produzidos.

A utilização de aditivos plastificantes para melhorar a trabalhabilidade de pastas cimentícias tem sido amplamente relatada na literatura. Aditivos plastificantes ou superplastificantes atuam reduzindo a demanda de água e aumentando a fluidez das pastas cimentícias, ou concretos, no estado fresco, viabilizando o manuseio destes materiais. Os aditivos químicos que fornecem trabalhabilidade aos concretos apresentam diferentes composições químicas, os plastificantes são, geralmente, feitos à base de lignossulfonatos e os superplastificantes são, usualmente, feitos de polímeros à base de melamina sulfonada ou compostos à base de policarboxilato. A ação destes aditivos químicos ocasiona em alterações à nível microestrutural, sendo fortemente atribuída a reações químicas que conduzem à formação e, ou, modificação da estrutura cristalina alterando as propriedades do concreto no estado fresco e possibilitando o manuseio sem o incremento de água na mistura (PAPO, PIANI, 2004; HOMMER, 2009; LI *et al.*, 2014; NAVARRO-BLASCO *et al.*, 2014; AUTIER *et al.*, 2014).

## **2.4 O ensaio de resistência à compressão axial**

A resistência dos concretos é um parâmetro fundamental de qualidade, seu desempenho é condicionado ao *design* do concreto, onde a relação água/cimento,

o tipo de cimento empregado, as condições físicas e químicas dos agregados empregados e a proporção dos mesmos influenciam diretamente nos resultados obtidos.

Dentre os principais ensaios de resistência conhecidos, à exemplo, o de resistência à tração por compressão diametral, no Brasil normatizado pela NBR 7.222 (ABNT, 2010) e o ensaio de módulo de elasticidade, normatizado pela NBR 8.522 (ABNT, 2017), destaca-se o ensaio de resistência à compressão axial, normatizado pela NBR 5.739 (ABNT, 2018). A resistência à compressão axial é determinada por meio de ensaios em corpos de prova padronizados e em idades pré-determinadas. Para a realização do ensaio é necessária a confecção de corpos de prova conforme o procedimento especificado pela NBR 5.738 (ABNT, 2016) ou a extração de testemunhos em campo, de acordo com o procedimento normatizado pela NBR 7.680 (ABNT, 2015).

Em relação aos corpos de prova, Pereira e Medeiros (2012) relatam que estes podem ser moldados em formatos cilíndricos ou prismáticos. No Brasil e nos Estados Unidos as normas preconizam a utilização dos corpos de prova cilíndricos, e na Europa ambos os formatos podem ser confeccionados para a execução do ensaio. De acordo com o estabelecido pela NBR 5.739 (ABNT, 2018) para a realização do ensaio de resistência à compressão axial deve-se atentar ao dimensionamento da amostra, o corpo de prova deve ter uma relação entre o comprimento e a seção transversal adequada para resistir à flexão e a flambagem, portanto, a altura deve ser igual a duas vezes o diâmetro do cilindro.

Conforme procedimento especificado pela NBR 5.738 (ABNT, 2016) para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, o concreto é depositado em duas camadas nos moldes, procedendo-se ao adensamento manual de cada uma, com 15 golpes para cada, uniformemente distribuídos em toda a seção transversal do molde. Após a moldagem, os corpos de prova são imediatamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar a perda de água do concreto e protegê-lo da ação de intempéries. A norma orienta que os corpos de prova permaneçam nas fôrmas por 24 horas, em condição de cura inicial ou até que o endurecimento do concreto permita a desforma sem causar danos aos corpos de prova. Em condições laboratoriais, os corpos de prova permanecem sob cura em câmara úmida com, no mínimo, 95% de umidade relativa do ar, atingindo toda

a superfície livre, com temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2$  até a idade prevista para o rompimento.

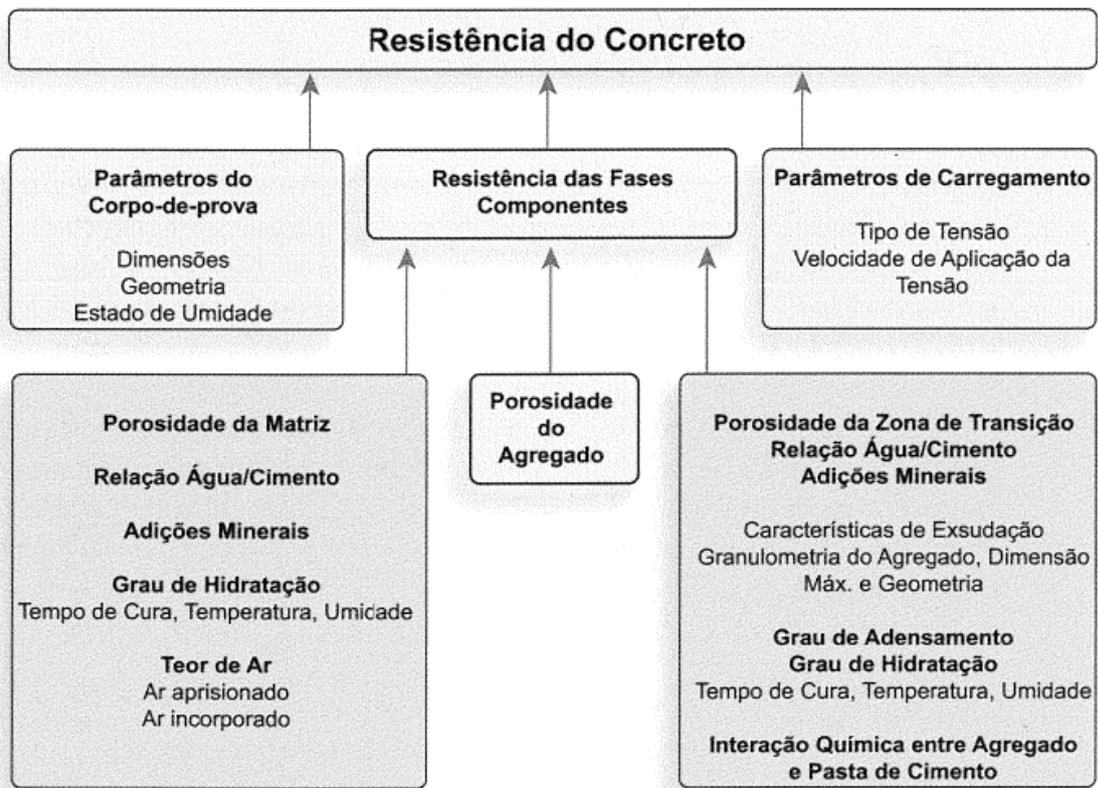
Ao atingir as idades pré-determinadas para a realização do ensaio, os corpos de prova são enviados à uma prensa para rompimento. A resistência à compressão simples é definida como a tensão última aplicada ao corpo de prova, esta, provoca a desagregação do material que o compõe, que se dá pela ruptura da matriz da pasta de cimento, ou, no caso de concretos de alta resistência, pela ruptura do agregado graúdo.

A partir dos dados de tensão e deformação obtidos nos ensaios de compressão simples dos concretos é possível construir um gráfico com os seus resultados, e a curva resultante é chamada de diagrama tensão-deformação. Por meio deste diagrama obtém-se os dados da resistência à compressão axial do concreto ensaiado. O diagrama tensão-deformação de uma determinada idade dos concretos depende não só da composição dos materiais constituintes das amostras e da proporção entre eles, mas também das características dos corpos de prova, como as imperfeições microscópicas e a forma como foram fabricados. São também condicionados aos métodos de ensaios empregados, como a velocidade da aplicação da carga e a temperatura durante o experimento (ALMEIDA, 2012).

A Figura 1, apresentada por Mehta e Monteiro (2014), resume as influências que podem ocorrer nos resultados de resistência à compressão. Segundo os autores, vários são os fatores que intervêm na resistência à compressão do concreto. Dentre os fatores influenciadores, além do *design* do concreto, destaca-se o tipo de cimento, atentando-se à finura e à composição química, e a relação água/aglomerante da mistura. Além disso, atenção deve ser despendida na observância das características dos agregados como o teor de absorção de água, as dimensões e suas texturas.

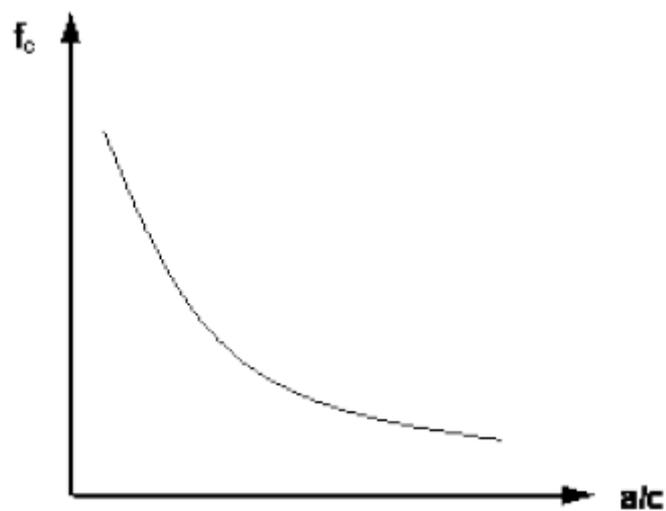
Dada a importância da relação água/cimento na influência sobre os resultados de resistência à compressão, considera-se a Lei de Abrams (ABRAMS, 1919) que consiste na relação de que quanto maior a quantidade de água adicionada na mistura menor será a resistência do concreto. Esta relação pode ser observada basicamente por meio da curva expressa na Figura 2.

**Figura 1** - Fatores de influência no resultado de um ensaio de compressão axial.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014.

**Figura 2** - Curva de Abrams, correlação entre resistência e relação água/cimento.



Fonte: ABRAMS, 1919.

Deste modo, a equação que sustenta a Lei de Abrams é representada pela Equação 3.

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

$f_c$  é a resistência em dias;

$k_1$  e  $k_2$  são as constantes condicionadas ao cimento e aos agregados;

$a/c$  é a relação água/cimento.

Folagbade (2016) conduziu um estudo avaliando a substituição parcial de cimento Portland por cinza volante em até 55% e por metacaulim em até 15%. Em seus resultados observou que a resistência à compressão reduziu com o aumento da relação água/cimento e com o aumento do teor de substituição de cinzas volantes por cimento Portland. Enquanto que a substituição parcial de cimento Portland por metacaulim resultou em concretos com resistências comparáveis ao concreto de referência, reduzindo ligeiramente conforme o teor de substituição aumentava.

O autor também realizou a substituição parcial de cimento Portland tanto por cinza volante como por metacaulim e observou que os concretos produzidos apresentaram resistência à compressão mais elevada do que os concretos produzidos apenas com cinza volante. Porém, foi observado que as resistências destes concretos eram inferiores ao concreto de referência, e que os resultados eram menores conforme o teor de cinzas volantes aumentava.

Sendo assim, em observância aos resultados obtidos neste estudo sugere-se coerência em relação à mencionada lei de Abrams, além de ser possível observar a influência que a escolha do tipo de cimento pode acarretar na resistência à compressão axial do concreto produzido.

## 2.5 Os ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos podem ser definidos como uma inspeção, teste ou avaliação de materiais, componentes ou conjuntos, sem destruir a peça ou o sistema (SCHABOWICZ, 2018). O objetivo dos ensaios não destrutivos consiste na determinação da qualidade e da integridade destes elementos sem afetar a capacidade de executar as funções pretendidas (HELAL *et al.*, 2015). Shih *et al.*

(2015) bem como Pereira e Medeiros (2012) destacam que a opção pelos ensaios não destrutivos pode ser uma vantagem, principalmente pelo ponto de vista financeiro, pois ao detectar-se um problema no estágio inicial, pode-se proceder as intervenções necessárias antes da ruína completa da estrutura. Para Shabowicz (2018) a principal vantagem dos ensaios não destrutivos é sua grande capacidade de realizar testes *in situ*. Além disso, os ensaios não destrutivos utilizados a nível laboratorial podem contribuir para a melhoria da qualidade do *design* do concreto com vistas à sua durabilidade em uso.

Em uma tentativa preventiva de erradicar os problemas associados à deterioração estrutural, foram criadas novas técnicas de testes *in situ* para permitir a avaliação de concreto durante as fases de construção, comissionamento e manutenção do ciclo de vida de uma estrutura. Os principais fatores que influenciam no sucesso de um levantamento não destrutivo são: a profundidade de penetração, a resolução vertical e lateral, o contraste nas propriedades físicas, a relação sinal-ruído e as informações existentes sobre a estrutura.

A compreensão das propriedades do material e os principais problemas associados à sua aplicação na engenharia estrutural é imperativa para o sucesso de qualquer método não destrutivo (HELAL *et al.*, 2015).

Segundo Shull (2002) os passos para escolher um ensaio não destrutivo adequado são:

Compreender a natureza física da propriedade material ou a descontinuidade a ser inspecionada; compreender os processos físicos subjacentes que governam o método; compreender a natureza física da interação do campo de sondagem com o material de teste; compreender as potenciais limitações da tecnologia não destrutiva disponível; e considerar fatores econômicos, ambientais, regulatórios dentre outros (SHULL, 2002, p. 37).

Diversas pesquisas abrangendo inúmeras áreas vêm sendo conduzidas utilizando-se de ensaios não destrutivos para a realização de inspeções em concreto. Constatou-se que os ensaios mais utilizados são os de resistividade elétrica (CASTELLOTE *et al.*, 2002; NOKKEN, 2016; PAGE; PAGE, 2007; COSTA; AZZI, 2017; PÉREZ, 2015; GODINHO *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2015), a esclerometria (SPALVIER, HALL E POPOVICS, 2017; HELAL; SOFI; MENDIS, 2015; SCHABOWICZ *et al.*, 2018; PEREIRA; MEDEIROS, 2012), o módulo de elasticidade dinâmico (CABRAL; MONTEIRO; HELENE, 2014; ALMEIDA, 2012;

CANESSO *et al.*, 2008) a ultrassonografia (SAJID *et al.*, 2018; ABDELOUAHEB *et al.*, 2016), e ensaios termogravimétricos (NARATTHA, *et al.*, 2015; WONGKEO *et al.*, 2013).

Os ensaios destrutivos exploram os mecanismos de falha e determinam as propriedades mecânicas do material, tais como resistência à deformação, resistência à compressão, resistência à tração, ductilidade e tenacidade à fratura (HELAL *et al.*, 2015; SCHABOWICZ, 2018). Enquanto isso, os métodos não destrutivos podem indicar propriedades sem atingir falhas de componentes ou montagens (SCHABOWICZ, 2018). Esses, se materializaram como uma resposta à necessidade de detecção e prevenção de danos estruturais e são impulsionados pela economia e segurança.

#### 2.5.1 Os ensaios não destrutivos e a resistência à compressão

Na busca pela utilização cada vez mais dos ensaios não destrutivos para prever e avaliar o desenvolvimento da resistência à compressão, pesquisadores testaram diferentes tipos de concreto: variando condições de cura (GESOĞLU, 2010), porcentagem de materiais constituintes (HADDADOU *et al.*, 2015), diferentes relações água/cimento (KHATIB, 2008) e com base nos resultados destes estudos buscaram elaborar curvas de correlação, desenvolver modelos matemáticos que previssem a resistência à compressão do concreto pela aplicação dessas fórmulas.

Shih *et al.* (2015) afirmam que, embora os ensaios não destrutivos sejam mais econômicos e eficientes em tempo em relação aos testes destrutivos, ainda não podem ser utilizados exclusivamente para este fim. Breysse (2012) complementa que no âmbito da estimativa da resistência à compressão os ensaios não destrutivos, por serem sensíveis primeiro às propriedades físicas, fornecem apenas uma maneira indireta para o desempenho mecânico do material.

Contudo, conforme verificado na literatura, (MOHAMMED *et al.*, 2011; SHARIATI, 2011; BREYSSE, 2012; HANNACHI; GUETTECHE, 2012; WANG *et al.*, 2014; NOBILE, 2015; PUCINOTTI, 2015) combinar diferentes ensaios não destrutivos melhoram as estimativas de resistência à compressão do concreto e resultados mais assertivos têm sido obtidos pelos pesquisadores.

Shih *et al.* (2015) correlacionaram resultados obtidos por meio dos ensaios não destrutivos de esclerometria e de velocidade de pulso ultrassônico com os resultados de resistência à compressão axial de concretos produzidos em laboratório com o auxílio de uma abordagem baseada em inteligência artificial. Os autores constataram que o uso dos dois ensaios não destrutivos gerou boas estimativas em relação aos resultados de resistência à compressão axial do concreto. Contudo, a aplicação da abordagem nos resultados dos ensaios não destrutivos de forma isolada, não gerou uma resposta tão satisfatória.

Em relação à durabilidade, de acordo com Schabowicz (2018) a condição atual da estrutura de concreto pode ser diagnosticada com mais precisão com o uso em conjunto de diferentes ensaios não destrutivos. Entretanto o autor afirma que parâmetros relacionados à durabilidade da estrutura são mais complexos de serem apurados, apesar de que os resultados de ensaios não destrutivos indicam defeitos desconhecidos ou ocultos que possam indicar fragilidade da estrutura, sobretudo afetando a resistência à compressão.

Em suma, segundo Breysse (2012) a eficiência e qualidade da estimativa de resistência à compressão por meio dos ensaios não destrutivos depende da tentativa de mitigar as incertezas causadas: pelo método de teste, por interferências com o meio ambiente ou aleatórias devido à variabilidade intrínseca do material, pela influência do fator humano e pela interpretação dos dados, incluindo erros no modelo entre o que é medido e o que é procurado.

Breysse (2012) analisou matematicamente conjuntos de dados de estudos de laboratório publicados na literatura e estudos *in loco* e concluiu que a estimativa de resistência à compressão por meio de métodos não destrutivos, sob ação dos fatores de influência elencados no parágrafo anterior, demonstra que se pode chegar a um erro quadrático médio com uma magnitude de cerca de 4 MPa.

Embora as dificuldades elencadas existam, as pesquisas recentes demonstram avanços no uso dos métodos, e as curvas de calibração são de grande importância para que a aplicação dos métodos seja utilizada de forma segura e aprimorada com o passar do tempo. Para tanto, conhecer as particularidades de cada método, com vistas a aprimorá-los torna-se também necessário. Os métodos propostos para este trabalho são vistos a seguir.

## 2.6 A resistividade elétrica

A resistividade elétrica, é sobretudo, um resultado indicativo da qualidade da microestrutura do concreto. Para Lencioni e Lima (2010) a importância da resistividade elétrica do concreto é justificada, pois esta propriedade física, juntamente com o acesso de oxigênio, dá abertura a um processo eletroquímico que gera o fenômeno da corrosão das armaduras em um concreto. Ou seja, a resistividade elétrica correlaciona-se com a intensidade do processo corrosivo de uma peça, sendo que, quanto menor for a quantidade de corrente elétrica passante pelo concreto, maior é o tempo requerido para a instauração da corrosão das armaduras.

Monfore (1968) afirma que a água evaporável presente nos poros capilares do concreto apresenta íons de cálcio, sulfatos, hidroxilas, além de cátions de sódio e potássio que garantem que a condução de eletricidade no interior do concreto ocorra de forma eletrolítica. Wilson (1986) complementa que, durante o endurecimento do concreto, tanto a água livre na mistura, quanto os íons dissolvidos nela, influenciam na variação das propriedades elétricas neste meio.

São fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica:

- a) Relação água/aglomerante: quanto maior esta relação possivelmente maior a quantidade de poros e, portanto, menor a resistividade elétrica (Helene, 1993);
- b) Agregados: durante as leituras de resistividade, sendo a resistividade dos agregados superior à pasta cimentícia, a corrente elétrica transitará em sua maioria pela pasta. Dessa forma, a resistividade elétrica do concreto tem sensibilidade maior à constituição da pasta cimentícia, não ao concreto em sua totalidade (WHITTINGTON; MCCARTER; FORDE, 1981; GOWERS; MILLARD, 1999). Do mesmo modo, concretos com maior quantidade de agregados serão mais resistentes (LENCIONI; LIMA, 2010).
- c) Hidratação do cimento: a resistividade elétrica do concreto aumenta com o avanço do processo de hidratação do cimento, pois as moléculas de água da pasta são consumidas por essas reações de hidratação (LENCIONI; LIMA, 2010). Page e Page (2007) complementam que progredindo a hidratação, apesar de a dissolução iônica prover uma

facilitação para a passagem de corrente elétrica, isso seria compensado pela redução no volume dos poros existentes. Este fenômeno dificultaria a movimentação destes íons, situação aliada ao fato de o caminho da transmissão paulatinamente ficar menos linear, por conta do aumento da tortuosidade entre os poros por onde transita o fluxo, ou seja, o caminho percorrido pela corrente se torna maior;

- d) Temperatura: o aumento da temperatura influencia na mobilidade iônica das soluções presentes nos poros do concreto. Com o aumento da temperatura a viscosidade destas soluções é diminuída, aumentando a mobilidade iônica e, conseqüentemente, aumentando a passagem de corrente elétrica (SILVA, 2016);
- e) Carbonatação: influencia de forma mais expressiva as leituras de resistividade elétrica superficial. Um concreto com superfície carbonatada irá apresentar maior valor de resistividade (POLDER et al., 2000);
- f) Grau de saturação do concreto: Neville (2015) mostrou que o concreto úmido representa um eletrólito com resistividade em torno de  $10^2$  ohm.m, mas em concretos secos em estufa, este parâmetro pode sofrer uma elevação da ordem de  $10^7$  ohm.m, podendo ser classificado como material isolante. Meira (2017) e Godinho *et al.* (2018) reafirmam que a umidade pode fazer variar significativamente as medidas de resistividade. Para que a umidade não interfira diretamente nas medições, pode-se adotar como referência a medição das propriedades elétricas do concreto em material totalmente saturado sendo que, neste caso, a resistividade elétrica tende a se tornar uma medida indireta da conectividade entre os poros do material (CASTELLOTE *et al.*, 2002).
- g) Adições minerais: são em sua maioria materiais inertes de pequenas dimensões e exercem influência na resistividade elétrica do concreto, pois, hora atuam como fíler, preenchendo os poros da matriz cimentícia, hora atuam como pozolanas e os cristais formados por reações com os produtos da hidratação do cimento também preenchem os vazios na matriz do concreto, diminuindo, portanto, a concentração iônica da solução. Por conseqüência, o concreto com adições minerais apresentará uma maior resistividade elétrica quando em comparação

com um concreto convencional, pois a densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros dificultarão a condução da corrente através do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014; LENCIONI, LIMA, 2010).

Costa e Azzi (2017) afirmam que o ensaio de resistividade elétrica é baseado na aplicação de uma corrente elétrica em um ponto do material, em seguida a corrente elétrica tende a penetrar pela estrutura porosa. A análise é feita pela diferença de potencial ocorrido, por meio da Equação 4 (HALLYDAY; RESNICK; WALKER, 2014):

$$\rho = \frac{A \times R}{L} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde, em um material cilíndrico;

$\rho$  é a resistividade em ( $\Omega \cdot m$ );

A é a área da seção transversal ( $m^2$ );

R é a resistência elétrica aplicada em ( $\Omega/m$ );

L é o comprimento longitudinal (m).

Diversos estudos apresentam o entendimento dos pesquisadores a respeito dos resultados de resistividade elétrica medidos e a sua correlação com a intensidade da corrosão. Hornbostel et al. (2013) compilam estes apontamentos dos autores (Tabela 1).

**Tabela 1** - Probabilidade de corrosão por meio das leituras de resistividade elétrica ( $\Omega m$ )

<b>Pesquisadores</b>	<b>Alto risco</b>	<b>Médio risco</b>	<b>Baixo risco</b>
Cavalier; Vassie (1981)	< 50	50-120	> 120
Hope; Ip (1985)	< 65	65-85	> 85
López; González (1993)	< 70	70-300	> 300-400
Morris et al. (2002)	< 100	100-300	> 300
Gonzalez et al. (2004)	< 200	200-1000	> 1000
Elkey; Sellevold (1995)	< 50	Em discussão	> 100-730
Andrade; Alonso (1996)	< 100	100-1000	>1000 – 2000
Polder (2001)	< 100	100 - 1000	>1000 – 2000
Broomfield; Millard (2002)	< 50	50-200	>200
Smith et al. (2004)	< 80	80 -120	> 120

Fonte: Adaptado de HORNBOSTEL et al., 2013.

Baronghel-Bouny *et al.* (2014) complementam que, nos concretos de baixa resistividade elétrica, a solução eletrolítica encontra-se mais dispersa na matriz

cimentícia propiciando o desenvolvimento da corrosão mais rapidamente. Por sua vez, um concreto com alta resistividade elétrica, dificulta a estabilização da solução eletrolítica nos poros tornando menos viável o processo corrosivo. A resistência à compressão pode ser associada aos resultados apurados, visto que, ao passo que o concreto resiste à passagem de corrente elétrica, mais densificada é a sua matriz cimentícia. Sendo assim, quanto mais a peça de concreto resistir à passagem da corrente elétrica maiores serão os resultados de resistência à compressão das peças avaliadas.

As medidas de resistividade podem ser feitas de duas maneiras, por meio do método de quatro eletrodos, conhecido como técnica de Wenner ou técnica das quatro pontas (WENNER, 1915), onde mede-se a resistividade elétrica superficial do concreto, e, também por meio da resistividade volumétrica. Costa e Azzi (2017) testaram os dois métodos de resistividade elétrica em diferentes idades em um concreto confeccionado com o uso de água potável, cimento Portland pozolânico como aglomerante, areia média como agregado miúdo e brita zero como agregado graúdo. Os concretos foram saturados previamente à realização dos ensaios propostos. De acordo com os resultados apurados por ambos os métodos foi constatado que os concretos produzidos tinham baixo potencial de desenvolvimento de corrosão. Observou-se, também, proporcionalidade entre os resultados das duas técnicas empregadas, sendo possível afirmar que há uma relação entre o método de apuração da resistividade elétrica superficial e o método de apuração da resistividade elétrica volumétrica.

#### 2.6.1 Resistividade elétrica superficial

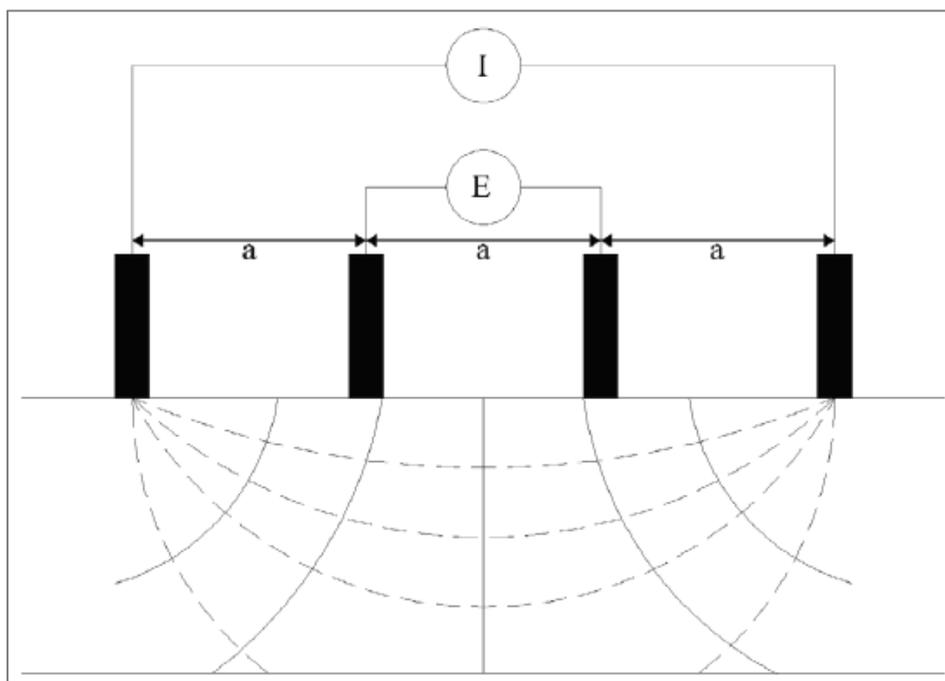
A técnica de Wenner (WENNER, 1915) mensura a resistividade elétrica próxima à superfície e é realizada encostando-se a extremidade de quatro eletrodos equidistantes e alinhados sobre a superfície do concreto (PRESUEL-MORENO *et al.*, 2013). Aplica-se uma corrente alternada em uma frequência entre 100 e 1000 Hz entre os eletrodos externos, na sequência mensura-se a diferença de potencial entre os eletrodos internos.

Ressalta-se a importância de observar com atenção o posicionamento dos eletrodos, sendo necessário que as medidas sejam tomadas o mais distante possível da localização das bordas do elemento estrutural e das armaduras.

Lencioni e Lima (2010) atentam que fatores intrínsecos ou extrínsecos ao concreto afetam com maior efetividade as medidas de resistividade elétrica superficial do material, resultando falsos valores baixos ou altos, que podem levar a interpretações errôneas quanto ao estado de uma estrutura, se em corrosão ativa ou não do aço.

Por meio da Figura 3 observa-se esquema relativo à esta técnica (GOWERS e MILLARD, 1999 *apud* MEIRA, 2017).

**Figura 3** - Esquema de Wenner para mensurar a resistividade superficial do concreto.



Fonte: GOWERS e MILLARD, 1999 *apud* MEIRA *et al.*, 2017, p. 82.

A diferença de potencial é obtida por meio dos eletrodos internos, o que possibilita o cálculo da resistividade elétrica utilizando a Lei de Ohm (RIBEIRO *et al.*, 2014). As leituras de resistividade elétrica são influenciadas pelo formato e dimensões e, desta forma, é necessário o cálculo de um fator de forma quando os corpos de prova têm uma relação  $b/d$  (comprimento longitudinal/diâmetro) menor que 6 (GODINHO *et al.*, 2018), este assunto é tratado também na norma espanhola UNE 83988-2 (ESPANHA, 2014). Ribeiro, Labrincha e Morelli (2012) apresentam uma formulação a respeito da medida de resistividade ao se utilizar eletrodos de pontas circulares, expressa por meio da Equação 5.

$$\rho_s = \frac{2\pi \cdot V \cdot L}{I} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

$\rho_s$  é a resistividade elétrica do concreto ( $\Omega \cdot m$ );

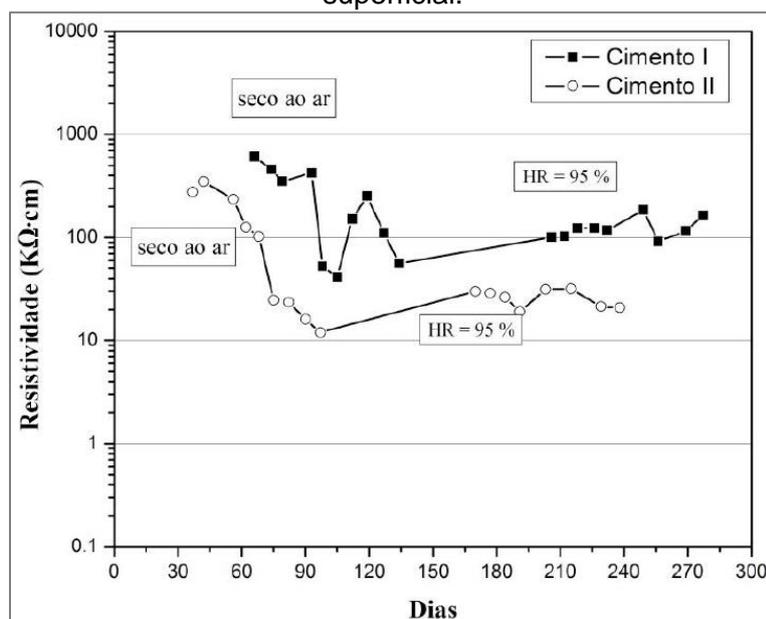
V é a tensão aplicada no corpo de prova (V);

I é a intensidade de corrente medida; (A);

L é a distância entre os eletrodos (m).

Importante destacar que o bom contato entre os eletrodos e o concreto é imprescindível para a obtenção de medidas confiáveis. O mau contato pode resultar em estimativas erradas de resistividade elétrica, principalmente na leitura da diferença de potencial, mais sensível ao contato (GOWERS e MILLARD, 1999). Conforme mencionado, a resistividade elétrica é extremamente influenciada pelas características do concreto e principalmente pelo teor de umidade presente na estrutura porosa do material. Deste modo, Meira (2017) apresenta, por meio da Figura 4, como a umidade pode trazer tal variação nos resultados de resistividade elétrica superficial.

**Figura 4** - Influência da quantidade de água nos poros do concreto na resistividade superficial.



Fonte: MEIRA, 2017, p. 83.

Assim, considerando que a resistividade elétrica superficial é influenciada fortemente pela umidade, se faz necessário averiguar se a medida realizada é

representativa das condições em que a estrutura analisada rotineiramente está submetida. Assim, em medições *in loco*, a ação da chuva, ou o calor excessivo provocado por um período de seca inesperado, por exemplo, podem resultar em eventos esporádicos e não apresentarem consistência para que as medidas aferidas em tais períodos possam ser consideradas representativas para uma dada estrutura. Nestes casos, para interpretação destas medidas, as relações apresentadas na Tabela 2) são usadas com frequência.

A Tabela 2 elenca faixas de valores de resistividade elétrica superficial e a correlação com o risco de corrosão de armaduras. Importante destacar que esta tabela foi definida com base em estudos de porosidade de concretos e que os altos valores de resistividade são indicativos de concretos com menor porosidade.

**Tabela 2** - Relação entre resistividade superficial e risco de corrosão

Resistividade elétrica superficial - $\rho_s$ ( $\Omega\text{m}$ )	Risco de corrosão
> 100	Insignificante
50 a 100	Baixo
10 a 50	Moderado a elevado
< 10	A resistividade não é o parâmetro controlador do processo de corrosão

Fonte: Compilado de Polder, 2000; CIGNA *et al.*, 2003 *apud* MEIRA, 2017, p. 83.

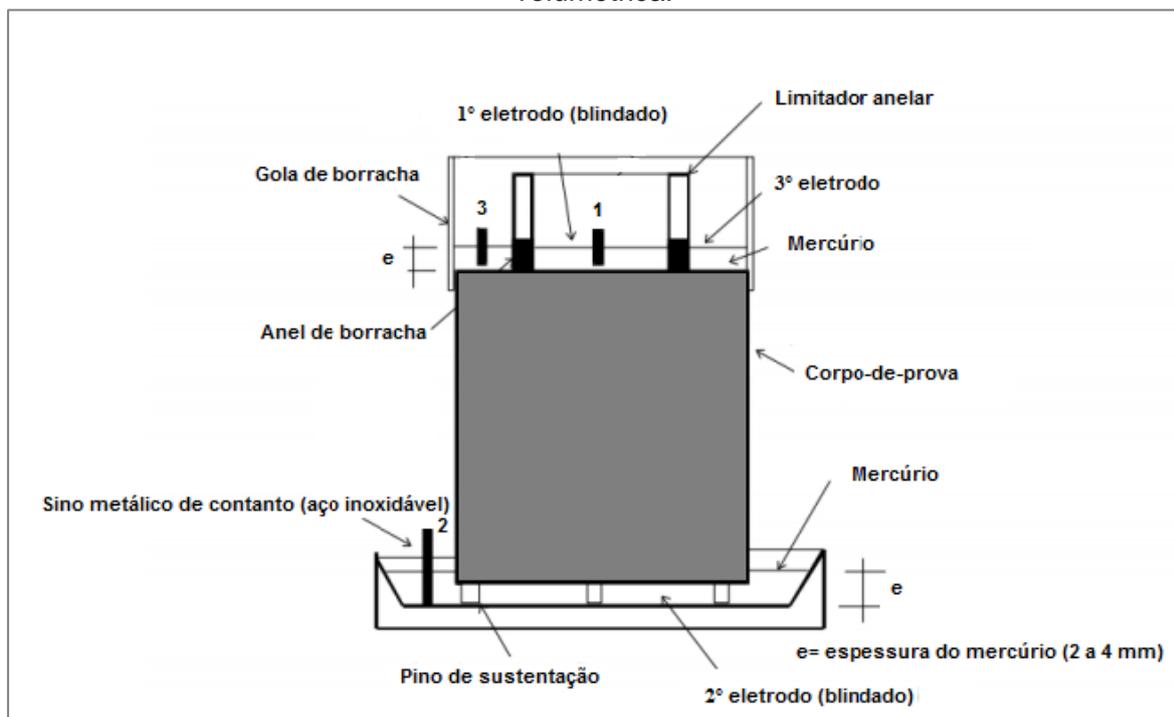
## 2.6.2 Resistividade volumétrica

Abreu (1998) afirma que há duas regiões características num elemento de concreto, as quais possuem valores de resistividade elétrica distintos: uma região mais superficial, sujeita a ciclos de molhagem e secagem, denominada resistividade elétrica aparente, e outra região mais interna, onde, segundo a autora, a umidade é mais estável, identificada como resistividade elétrica volumétrica. O método da resistividade elétrica volumétrica foi apresentado por Abreu (1998), conforme descrito na NBR 9.204 (ABNT, 2012), de acordo com esquema ilustrado na Figura 5.

Para este método, são utilizados corpos de prova cilíndricos, de dimensões (10x20) cm ou (15x30) cm, extraídos de estruturas ou moldados de acordo com a NBR 5.738 (ABNT, 2016). Durante a execução deste ensaio, a umidade de cada corpo de prova é monitorada. Realiza-se a medição da resistividade elétrica volumétrica em diversas idades, por meio da aplicação de uma tensão de  $50 \pm 0,5$

V, com corrente contínua. A seguir, procede-se à leitura da corrente que atravessa o corpo de prova, em miliampère (mA). Em cada ensaio, coleta-se a massa do corpo de prova, assim como se mede a temperatura e a umidade nas imediações do mesmo, além da tensão e corrente (PEREZ, 2015).

**Figura 5** - Esquema de montagem do corpo de prova para o ensaio de resistividade volumétrica.



Fonte: ABREU, 1998.

O cálculo da resistividade elétrica volumétrica ( $\rho_v$ ) é realizado de acordo com a expressão evidenciada na Equação 6.

$$\rho_v = \frac{V \cdot A}{I \cdot h} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

$\rho_v$  é a resistividade elétrica volumétrica do corpo de prova na idade de ensaio ( $\Omega\text{m}$ );

V é a tensão aplicada no corpo de prova (V);

A é a área do eletrodo principal ou blindado ( $\text{m}^2$ );

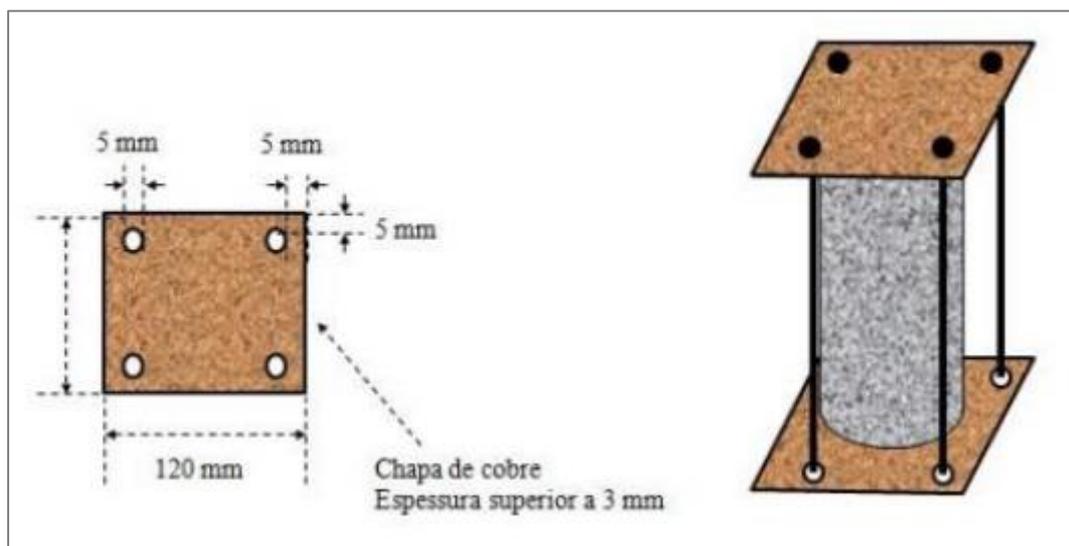
I é a corrente elétrica que atravessa o corpo de prova (A);

h é a altura total do corpo de prova (m).

No Brasil o ensaio de resistividade elétrica volumétrica em concretos é normatizado pela NBR 9.204 (BRASIL, 2012), e diversos estudos optam também por utilizar a norma internacional UNE 83988-1 (ESPANHA, 2008).

No estudo mencionado anteriormente, conduzido por Costa e Azzi (2017), com o intuito de comparar os resultados obtidos por meio dos ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica, há um exemplo de como executar o ensaio de resistividade elétrica volumétrica na prática. Para tal, foram utilizados dois eletrodos de cobre sendo estes posicionados nas extremidades dos corpos de prova confeccionados, para auxiliar no contato entre as superfícies utilizou-se esponja de aço úmida. Por meio de um banco de resistência foi direcionada a corrente alternada, a uma frequência estabelecida. O osciloscópio executou a leitura e, deste modo, foi possível avaliar os resultados informados de quedas dos potenciais entre os eletrodos. Este aparato foi desenvolvido por Lamounier et al. (2014) com base nas normas supracitadas no parágrafo anterior. Na Figura 6 observa-se o sistema utilizado para execução deste ensaio. Outros pesquisadores como Lage (2018) e Correia (2019) também utilizaram este mesmo equipamento.

**Figura 6** - Esquema demonstrando o aparato desenvolvido Lamounier et al. (2014) para execução do ensaio de resistividade volumétrica.



Fonte: Lamounier et al. (2014)

## 2.7 O módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, é um parâmetro que permite a mensuração da rigidez de um material, associando-se às propriedades

mecânicas como tensões de ruptura e escoamento, propagação de trinca, entre outras (ISAIA, 2011; MEHTA e MONTEIRO, 2014). O módulo de elasticidade é um dos parâmetros que caracterizam o concreto quanto à sua capacidade estrutural.

Quando um corpo de prova de um dado material é submetido a tensões crescentes de tração ou de compressão, tipicamente se verifica que até determinado limite superior de tensão, as tensões ( $\delta$ ) são proporcionais às deformações específicas correspondentes ( $\varepsilon$ ), entendendo como deformação específica o quociente entre o alongamento ou encurtamento do corpo de prova e o comprimento inicial deste (SANTOS; HELENE, 2013). Advém-se, portanto, da Lei de Hooke expressa pela Equação 8.

$$\delta = E \cdot \varepsilon \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$\delta$  é a tensão (MPa);

E é o módulo de elasticidade (GPa);

$\varepsilon$  é a deformação (m).

A constante de proporcionalidade (E) é uma propriedade característica do material e é denominada de Módulo de Elasticidade. Geometricamente, o módulo é a tangente do menor ângulo que o trecho retilíneo do diagrama tensão x deformação forma com o eixo das deformações. Decorre que, quanto mais próximo da vertical (eixo das tensões) estiver o diagrama tensão x deformação, maior o módulo da elasticidade do material (SANTOS; HELENE, 2013).

De acordo com a NBR 6.118 (ABNT, 2014) a deformação elástica dos concretos está intimamente ligada à composição do traço, em especial, condiciona-se à natureza dos agregados. Medeiros (2012) afirma ainda que, além dos agregados, o módulo de elasticidade também é especialmente afetado pela pasta de cimento. De acordo com Cabral *et al.* (2014) em materiais heterogêneos, como é o caso do concreto, a massa específica, a fração volumétrica e o módulo de deformação dos principais componentes, além das características da zona de transição, determinam o comportamento elástico do compósito.

Segundo Neto e Helene (2002), para o estudo do módulo de elasticidade é necessário analisar alguns fatores que podem influenciar os ensaios tais como a

natureza do agregado graúdo, diâmetro nominal do agregado graúdo, velocidade de aplicação da carga, dimensão dos corpos de prova, temperatura do ensaio, dentre outros. De acordo com os autores quanto menor for a relação água/aglomerante adotada no traço maior será o módulo de elasticidade. Apesar de o módulo do agregado ser maior, o que prevalecerá é o da pasta cimentícia (SANTOS; HELENE, 2013).

Gagliardo *et al.* (2013) afirmam pode ser estabelecida uma relação direta entre a resistência à compressão do concreto e o módulo de elasticidade. Contudo, Almeida (2012) alerta que essa relação advém do fato de que ambos são afetados pela porosidade das fases constituintes do concreto, porém não em mesma proporção. Mehta e Monteiro (2014) conceituam que em diferentes dosagens de concreto e em diferentes resistências descobriu-se que, em idades mais avançadas, o módulo de elasticidade aumentava com uma taxa mais alta do que a resistência à compressão. Este fato foi atribuído aos efeitos benéficos da melhoria da densidade da zona de transição na interface, resultante da lenta interação química entre a pasta de cimento e o agregado, mais pronunciada para a relação tensão-deformação do que para a resistência à compressão do concreto. Monteiro (2012, p.143) complementa:

O módulo de elasticidade do agregado constitui um dos fatores que determina a resistência do concreto, e o aumento da resistência geral do concreto aumenta com o aumento do módulo de elasticidade do agregado. A relação entre a resistência do concreto e módulo de elasticidade do agregado pode ser explicado pelo efeito da rigidez do agregado sobre a distribuição da carga no concreto (MONTEIRO, 2012, p. 143).

Segundo Mehta e Monteiro (2014) a resistência à compressão do concreto aumenta quando a matriz da pasta de cimento determina a sua resistência, entretanto o módulo de elasticidade é reduzido. Em concreto comum, em que o agregado é significativamente mais resistente do que a pasta, a resistência mecânica é determinada principalmente pela resistência da pasta. Por isso, o decréscimo da resistência com a fratura da matriz da pasta de cimento diminui a resistência mecânica do concreto. A esse respeito nota-se que as diferentes resistências são devidas às diferenças nas resistências do agregado e no seu módulo de elasticidade.

Sob a ação de cargas externas e, também, do peso próprio, o concreto apresenta deformações e, ao contrário do aço, não obedece puramente a Lei de

Hooke, conduzindo a um diagrama tensão x deformação curvo. Assim, são considerados três tipos de módulo de elasticidade: o estático tangente inicial e secante, bem como o módulo de elasticidade dinâmico (SANTOS; HELENE, 2013).

A NBR 8.522 (ABNT, 2017) apresenta a metodologia para a determinação do módulo de elasticidade estático por meio de ensaio de compressão de corpos de prova em concretos travados em prensa hidráulica, aplicando ciclos sucessivos de carga e descarga para que seja medida a sua deformação em função da tensão aplicada.

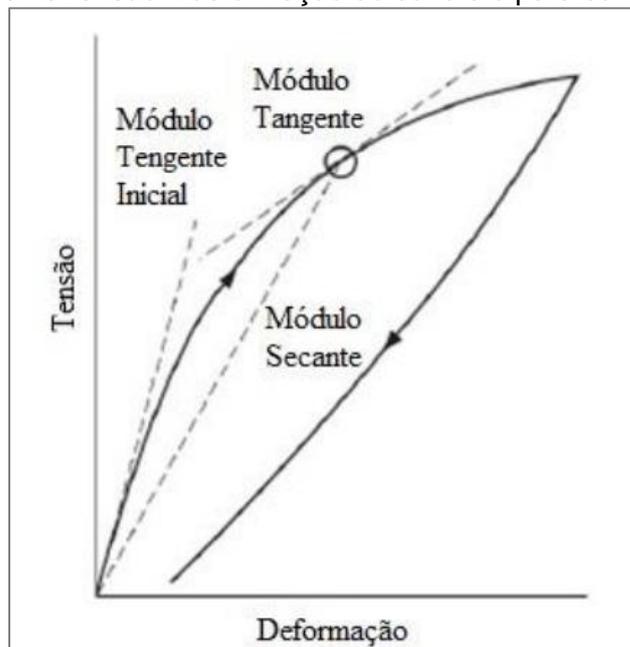
O módulo de elasticidade dinâmico é determinado pela aplicação de ondas em um corpo de prova com dimensões conhecidas, sendo que o módulo de elasticidade dinâmico apresenta resultados maiores que o módulo de elasticidade estático na ordem de 20 a 40% (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Muitos problemas ocasionados em estruturas de concreto armado decorrem da não consideração assertiva das deformações e dos deslocamentos nas primeiras idades. Desformas prematuras causam flechas excessivas em lajes e protensões aplicadas quando a resistência é satisfatória. Contudo, nesta condição, os módulos de elasticidade ainda são muito baixos e acarretam em contra flechas que não serão anuladas pelo carregamento futuro (SANTOS; HELENE, 2013).

Os valores dos módulos de elasticidade utilizados nos cálculos para projetos de concreto são normalmente estimados a partir das expressões empíricas que supõem dependência direta do módulo de elasticidade com a resistência à compressão e massa específica do concreto. Como primeira aproximação, isso faz sentido visto que o comportamento de tensão - deformação dos três componentes do concreto, a saber, agregado, matriz da pasta de cimento e zona de transição na interface, seria, na verdade, determinado pelas suas resistências individuais, que, por sua vez, estão relacionadas à resistência última do concreto.

O diagrama tensão x deformação demonstrado na Figura 8 exemplifica os pontos os quais os módulos de elasticidade são obtidos. Como pode ser visto, cada módulo de elasticidade é obtido em fases distintas de um ensaio à compressão. Há, portanto, uma divisão em dois grandes grupos de análise: o módulo estático e o módulo dinâmico.

**Figura 7** - Diagrama tensão x deformação do concreto para compressão simples.



Fonte: NEVILLE, 2013.

O ensaio de módulo de elasticidade estático é um ensaio destrutivo e apresenta algumas limitações no tocante à assertividade dos resultados visto que o concreto é um material heterogêneo. Deste modo, o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico oferece mais benefícios, trata-se de um ensaio não destrutivo, simples, rápido, e pode ser feito, se necessário. É melhor indicado no acompanhamento de estruturas de concreto *in loco*, evitando assim, a extração de testemunhos (SARTORI *et al.*, 2018).

### 2.7.1 Módulo estático

A NBR 6.118 (ABNT, 2014) apresenta uma formulação para o cálculo do módulo de elasticidade estático, para concretos com  $f_{ck}$  compreendidos entre 20 e 50 MPa expressa conforme Equação 9.

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \cdot 8 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

$E_{ci}$  é o módulo de elasticidade estático (GPa);

$f_{ck}$  é a resistência à compressão característica do concreto (MPa);

$\alpha_E$  é uma constante que varia em função do tipo de agregado utilizado no concreto, sendo  $\alpha_E = 1,0$  para granito e gnaiss.

Segundo Helene (2002) os módulos estáticos se dividem em:

a) Módulo tangente na origem: é dado pela declividade de uma linha traçada de forma tangente à curva de tensão – deformação em qualquer ponto da curva. Do ponto de vista prático do ensaio corresponde ao módulo de elasticidade cordal entre 0,5 MPa e 0,3  $F_c$  e ao módulo de elasticidade secante a 0,3  $F_c$ .

b) Módulo secante: é dado pela declividade de uma linha traçada a origem até um ponto da curva, que corresponde à tensão de 40% da carga da ruptura. Em geral trabalha-se com o módulo cordal entre 0,5 MPa e 0,4  $F_c$ , que é equivalente ao módulo de elasticidade secante a 0,4  $F_c$ .

c) Módulo cordal: é dado pela inclinação de uma linha traçada entre dois pontos da curva tensão – deformação, do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado.

Conforme a NBR 8.522 (ABNT, 2017) para a realização do ensaio de módulo de elasticidade estático são necessários três corpos de prova cilíndricos de concreto moldados conforme as recomendações da NBR 5.738 (ABNT, 2016), assim como, também pode ser executado por meio de testemunhos extraídos *in loco*.

Os corpos de prova deverão ser alocados em compressômetro de bases independentes e conduzidos à uma prensa. Os corpos de prova deverão permanecer centrados geometricamente, com seus eixos coincidindo com os eixos de aplicação da carga. A velocidade do carregamento aplicado deve ser de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa/s e pode ser conduzido por meio de duas metodologias distintas, ou por Tensão  $\sigma_a$  fixa ou por deformação específica  $\varepsilon_a$  fixa. O procedimento relativo a este ensaio por ambas as metodologias se encontra descrito detalhadamente na NBR 8.522 (ABNT, 2017). Após a realização do ensaio e apuração dos dados por meio da metodologia por Tensão  $\sigma_a$  fixa o módulo de elasticidade pode ser aferido por meio da Equação 10. Se o ensaio for conduzido por meio da metodologia por deformação específica  $\varepsilon_a$  fixa o cálculo do módulo de elasticidade deve ser realizado por meio da Equação 11.

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, ou outra tensão especificada em projeto (MPa);

0,5 é o valor da tensão básica (MPa);

$\varepsilon_b$  é a deformação específica do concreto sob a tensão maior;

$\varepsilon_a$  é a deformação específica do concreto sob a tensão básica.

$$E_{ci,i} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} 10^{-3} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

$\sigma_b$  é a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, ou outra tensão especificada em projeto (MPa);

$\sigma_a$  é a tensão básica correspondente à deformação específica  $50 \times 10^{-6}$  (MPa);

$\varepsilon_b$  é a deformação específica do corpo de prova sob a tensão maior.

## 2.7.2 Módulo dinâmico

Atualmente duas técnicas experimentais dinâmicas têm sido muito utilizadas: a da velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos através do material e a da frequência ressonante fundamental de vibração. Barbosa et al. (2015) citam também outras pesquisas envolvendo ensaios de vibração livre, rotação de vigas, pulsos e métodos térmicos. A técnica do ultrassom baseia-se na relação estabelecida por Rayleigh entre a velocidade de propagação do som em determinada amostra (material, forma e dimensões), sua massa específica e suas características elásticas (MALHOTRA *et al.*, 1991). A segunda técnica, frequência ressonante, determina os valores da frequência natural de vibração ( $F_r$ ), frequência alta ( $F_h$ ), frequência baixa ( $F_l$ ) e o coeficiente de amortecimento ( $Q$ ) (ALMEIDA, 2012). Para a definição do módulo de elasticidade dinâmico são utilizados os valores da frequência ressonante em função da densidade do corpo de prova.

De acordo com Barbosa *et al.* (2015) há algumas formas preconizadas em normas para se obter o módulo de elasticidade dinâmico. São essas, por meio de pulsos ultrassônicos, conforme recomendada por Malhorta e Silvasundaram (2004), que ainda afirmam que por meio desta técnica é possível se obter resultados com maior precisão. Por meio desta abordagem o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido por meio da Equação 12, recomendada pela NBR 8.802 (ABNT, 2013).

$$Ed = \gamma \cdot V^2 \cdot \left[ \frac{(1 + \nu) + (1 + 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)} \right] \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

$E_d$  é módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

$V$  é a velocidade do pulso ultrassônico (m/s);

$\gamma$  é a densidade de massa no estado endurecido ( $\text{kg/m}^3$ );

$\nu$  é o Coeficiente de Poisson.

A NBR 15.630 (ABNT, 2009) também propõe a utilização de pulso ultrassônico para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, contudo esta norma se destina apenas a argamassas para assentamento e revestimento.

Há também o método de medição das frequências ressonantes transversal, longitudinal e torcional de prismas e cilindros de concreto. Esta metodologia é abordada na C 215 (ASTM, 2008) por meio da Equação 13.

$$Ed = \left( 4 \cdot L^2 \cdot F^2 \cdot \frac{P}{\delta} \right) \cdot 10^{-6} \quad \text{Eq. 13}$$

Onde:

$E_d$  é módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

$L$  é o comprimento do CP (m);

$F$  é a frequência de ressonância longitudinal (hertz);

$P$  é o peso volumétrico ( $\text{N/m}^3$ );

$\delta$  é a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ).

De acordo com o manual do equipamento utilizado neste estudo, elaborado pela *CNS Farnell Ltd Erudite Instrument* (1995), tomando como base o artigo escrito por D. M. Vale, a equação para calcular o módulo de elasticidade dinâmico longitudinal (GPa), é:

$$E_d = 4 \cdot n^2 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot 10^{-9} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

$E_d$  é o módulo de elasticidade dinâmico (GPa)

$l$  é o comprimento da amostra (m);

$n$  é a frequência do modo fundamental de vibração longitudinal (Hz)

$\rho$  é a densidade ( $\text{kg/m}^3$ ).

De acordo com Canesso *et al.* (2008) e Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena, é dado aproximadamente pelo módulo tangente inicial que é o módulo tangente para uma linha traçada a partir da origem. Conforme mencionado anteriormente, é geralmente 20, 30 e 40% mais alto do que o módulo de elasticidade estático para concretos de alta, média e baixa resistência, respectivamente.

Em relação a este fato Leonhardt (2008) explica que na propagação das ondas, o nível de tensão gerado é pequeno e não se desenvolve em todo o corpo, de modo que a deformação é pequena, ao contrário do módulo de elasticidade estático, que mede a deformação real causada pela tensão aplicada no concreto. Por isso, o módulo de elasticidade dinâmico normalmente apresenta resultado maior do que o módulo de elasticidade estático.

## **2.8 A velocidade de pulso ultrassônico**

A velocidade de pulso ultrassônico (VPU) é obtida por meio de um ensaio que consiste em utilizar a reflexão ou reverberação de ondas ultrassônicas para realização de inspeções em materiais (SOUZA *et al.*, 2015). A técnica de ultrassom, assim como a de resistividade elétrica, pode ser utilizada como parâmetro para estimar a qualidade e a durabilidade do concreto. Este método consiste, basicamente, na medição do tempo necessário para que um pulso de ondas

ultrassônicas atravesse um espaço entre dois transdutores eletrônicos (ABNT, 2019).

Ao posicionar esses receptores em faces diretamente opostas de um corpo de prova, a medida linear deste elemento é utilizada para o cálculo da velocidade de propagação do pulso ultrassônico, que pode ser usado como indicador da homogeneidade. Desta forma, quanto maior é a velocidade de propagação de onda ultrassônica, maior é a densidade do concreto e consequentemente, maior é o refinamento dos poros e sua durabilidade frente a penetração de agentes agressivos (GODINHO *et al.*, 2018; ABDELOUAHEB; ABDELHALIM, 2016).

De acordo com Ribeiro *et al.* (2014) e a NBR 8.802 (ABNT, 2019), apesar de não existir uma relação direta entre a velocidade da onda no concreto e sua resistência mecânica, o conceito de que a onda sonora se propaga mais rapidamente no meio mais denso indica a possibilidade de se correlacionar a velocidade medida com a qualidade do concreto executado, podendo indicar um concreto de qualidade muito fraca, com velocidade de onda ultrassônica menor que 2.000 m/s, até um material excelente com velocidade de onda superior a 4.500 m/s.

Breysse (2012) em um aprofundado estudo da arte sobre ensaios de propagação de pulso ultrassônico em concretos, chegou à conclusão que, em concretos homogêneos, a acurácia deste método é elevada, com desvios apenas na ordem de 1 a 2,5%, o que representa um desvio na ordem de 40 a 100 m/s em concretos onde a VPU média é de 4.000 m/s.

Ainda de acordo com este estudo de Breysse (2012), são fatores de influência no resultado do ensaio de propagação de pulso ultrassônico, e estes devem ser considerados nas análises dos resultados:

- a) Agregados: o tipo e o tamanho podem variar em cerca de 400 m/s a VPU de um concreto, enquanto que, somente no agregado, esta variação seria entre 2000 m/s em média. Porcentagem na matriz de um concreto - uma alta porcentagem de agregados graúdos pode majorar o resultado da VPU;
- b) O tipo de cimento, a porcentagem de cimento e também as porcentagens de adições minerais: influenciam, porém com menor significância se comparados à influência do agregado;

- c) Condições de cura: concretos curados ao ar, bem como concretos saturados têm uma variabilidade dos valores da VPU, entre eles, na faixa de 5%;
- d) Presença de armaduras: as armaduras são boas condutoras da VPU, portanto é aconselhável que as medições sejam em pontos em que se tenha um distanciamento suficiente das armaduras;
- e) Influência da temperatura: entre 0°C e 30°C não há influência significativa;
- f) Idade do concreto: a VPU se estabiliza a medida em que os processos de hidratação do concreto vão finalizando, ou seja, em concretos com idades avançadas a leitura da VPU não sofrerá grandes diferenças;
- g) Carbonatação: como as leituras de VPU são com a aplicação dos transdutores na superfície do concreto, aqueles que estiverem com maior profundidade de carbonatação poderão apresentar valores superestimados de VPU, já que a superfície terá menos poros que a matriz interna;
- h) Defeitos constitutivos, vazios, trincas ou rachaduras: a VPU é fortemente alterada na presença de defeitos, pois estes acarretam distúrbios na propagação do pulso e a leitura apurada pode não apresentar a fiel representação do concreto em estudo.

Ainda a respeito da presença de vazios no concreto, esta pode ser considerada a principal informação indicativa da qualidade de um concreto submetido ao ensaio de ultrassom. Quanto menos vazios, maior será a velocidade de propagação, e correlacionando à formação de cristais de hidratação do cimento, quanto mais cristais estiverem formados, por consequência tem-se maior resistência à compressão (GODINHO *et al.*, 2018). Portanto, este ensaio pode também indicar o ganho de resistência à compressão a medida em que a velocidade de pulso aumenta com o decorrer do tempo, ou seja, com o ganho de maturidade do concreto até completude do processo de hidratação.

A norma C 597 (ASTM, 2016) determina que a velocidade de pulso ultrassônico está diretamente relacionada ao módulo de elasticidade e à densidade do concreto, sendo essa correlação expressa por meio da Equação 15. Destaca-se que, para esta norma, considera-se o módulo de elasticidade dinâmico para o cálculo ao invés do módulo de elasticidade estático.

$$V = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

$V$  é a velocidade de pulso ultrassônico (m/s)

$E$  é o módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

$\mu$  é o coeficiente dinâmico de Poisson;

$\rho$  é a densidade (kg/m<sup>3</sup>).

Baseando-se em um levantamento bibliográfico foi possível perceber diferentes conclusões sobre o uso desta técnica não destrutiva para a estimativa da resistência de concretos. Sajid *et al.* (2018) conduziram um estudo com o objetivo de investigar as perspectivas do uso do ensaio de velocidade de pulso ultrassônico e do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico pelo método de medição das frequências ressonantes para aferir a resistência à compressão de um concreto. Os autores concluíram que as técnicas utilizadas podem ser empregadas de forma confiável na estimativa da resistência do concreto.

Soeiro *et al.* (2018) também realizaram estudos no intuito de avaliar a qualidade do concreto por meio de ensaios de velocidade de pulso ultrassônico e esclerometria. Os autores realizaram a avaliação de um concreto estrutural de uma edificação paralisada há mais de 22 anos por meio de ensaio *in loco*. Os autores utilizaram ferramentas gráficas e tabelas para correlacionar os resultados obtidos. Os ensaios de velocidade de pulso ultrassônico obtidos qualificaram o concreto utilizado na edificação como de baixa qualidade. Sendo os valores encontrados para a maioria dos pilares dos primeiros pavimentos na ordem de 2.000 m/s e 3.000 m/s. Apenas 18% desses pilares apresentaram resultados de velocidade de pulso ultrassônico superior a 3.500 m/s, caracterizando como concretos de boa qualidade. Nos ensaios realizados de esclerometria, os resultados de resistência do concreto obtidos compreenderam o intervalo de 20 MPa a 45 MPa. Baseando-se nos resultados obtidos no ensaio de esclerometria, o concreto analisado foi classificado como concreto estrutural e apresentou qualidade satisfatória em relação à durabilidade da construção.

Assim sendo, os autores constataram uma divergência entre os resultados apurados nas técnicas não destrutivas empregadas em relação a qualidade do concreto. Estes concluíram que os valores do ensaio de resistência do concreto podem estar sendo influenciados pela carbonatação superficial do material, promovendo a superestimação da resistência. Este fato é coerente com o mencionado no item 2.9 do presente trabalho, onde é esclarecido que a esclerometria é uma técnica não destrutiva que sofre influência direta em relação ao tipo de acabamento da superfície, à idade da estrutura, à presença de carbonatação das camadas mais externas ao concreto, dentre outras características (MALHORTA, 1984; SOUZA *et al.*, 2015). Importante destacar que o estudo de Soeiro *et al.* (2018) se trata de um concreto em idade avançada, com grande desenvolvimento de carbonatação, algo que não ocorre nas primeiras idades do concreto, conforme destacado anteriormente dos estudos de Breysse (2012).

Portanto, um número maior de ensaios não destrutivos deve ser conduzido em conjunto para uma apuração mais assertiva em relação à correlação entre os resultados destes com a resistência à compressão dos concretos verificados. Além disso, os autores afirmam que para o caso de concretos *in loco* que apresentam idade avançada, outros ensaios poderiam ser executados como ensaios de carbonatação do concreto e a extração de testemunhos, objetivando um diagnóstico e prognóstico mais preciso sobre o material.

## **2.9 A esclerometria**

A esclerometria é um ensaio capaz de estimar a dureza superficial de uma peça estrutural e também a qualidade do concreto endurecido. O método consiste em um martelo (Martelo de Schmidt) que, impulsionado por uma mola, se choca com a área de ensaio. Com isso, é feita uma correlação, em laboratório, da resistência (obtida no ensaio) com a real (obtida em prensas com testemunhos extraídos) (SOUZA *et al.*, 2015).

Pereira e Medeiros (2012) complementam que este método se baseia na medição da dureza superficial do concreto e possui como variável de resposta um índice de reflexão que pode ser usado para a estimativa da resistência a partir da construção de curvas de correlação.

O procedimento de análise preconizado pela NBR 7.584 (ABNT, 2012) requer uma superfície limpa, seca, plana e uniforme. Recomenda-se realizar o teste com dezesseis leituras em cada área, espaçadas com 3 cm entre elas e não devem ser efetuadas duas medições no mesmo ponto. Deseja-se que esta área seja quadrada, proporcionando menor dispersão dos dados, pois a região analisada é menor. Deve-se também evitar leituras com distância menor que 5 cm das arestas da estrutura. Após uma predefinição da área onde será realizado o ensaio, deve-se encontrar as armaduras do elemento estrutural com o auxílio de um equipamento localizador de armaduras, a fim de que as medições não sejam comprometidas pela interferência destas (SOUZA *et al.*, 2015). A formulação que correlaciona a resistência à compressão do concreto com o índice esclerométrico do aparelho é descrita pela Equação 7 (PROCEQ, 2019).

$$f_{ck} = 2,77 e^{0,048Q} \quad \text{Eq. 7}$$

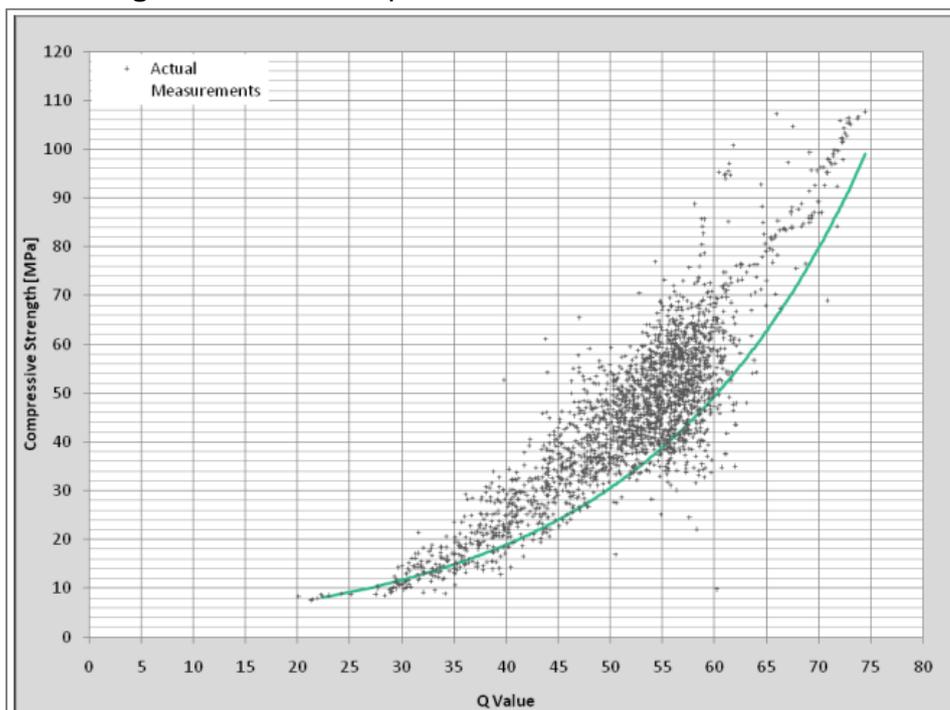
Onde:

$f_{ck}$  é a resistência característica à compressão do concreto (MPa);

$Q$  é o índice esclerométrico do aparelho.

Segundo a NBR 7.584 (ABNT, 2012), deve ser adotado um desvio-padrão máximo de 3 de índice esclerométrico para o ensaio, o que, aplicando na equação para determinação da resistência, significa uma possível variação de 3,2 MPa tanto para mais, como para menos.

Outra maneira de realizar a verificação para encontrar a resistência do concreto é observar diretamente a curva formada pela Equação 7. A validade dos dados fica restrita à valores de  $Q=22$  até  $Q=75$  para o valor do índice do equipamento. Isso corresponde a uma faixa que abrange valores de 8 MPa até 100 MPa. A curva da Eq. 7 encontra-se ilustrada na Figura 8.

**Figura 8** - Curva comparativa do ensaio de Esclerometria.

Fonte: PROCEQ, 2019.

Segundo Malhotra (1984) e Souza *et al.* (2015), os fatores que mais influenciam os resultados do ensaio de esclerometria são o tipo de acabamento da superfície, tipo de agregado, inclinação do esclerômetro, carbonatação das camadas mais externas do concreto, idade da estrutura, umidade e tipo de cimento além do proporcionamento do concreto.

De acordo com a literatura verificada alguns autores buscaram correlacionar os resultados obtidos por meio do ensaio de esclerometria e outros ensaios não destrutivos, com resultados de resistência a compressão axial, como o estudo conduzido por Spalvier *et al.* (2015). Neste estudo os autores utilizaram alguns ensaios distintos para estimar a resistência de um concreto pré-existente. Dentre os ensaios empregados para a estimativa, destacam-se a esclerometria e testes de arrancamento. Os autores realizaram uma análise comparativa por meio da relação entre os resultados ensaios de esclerometria e de arrancamento e os resultados dos ensaios de resistência à compressão. Os autores também quantificaram a variabilidade, incerteza e sensibilidade de cada um dos métodos, conferindo confiabilidade nas análises obtidas. Assim, os autores concluíram que a esclerometria e o teste de arrancamento produziram correlações positivas muito claras com a resistência à compressão. Ambos os métodos foram capazes de diferenciar os concretos de baixa resistência dos concretos de resistência regular.

Deste modo, ambos os métodos mostraram um potencial positivo para uso na estimativa da resistência à compressão *in loco* com o uso de metodologias específicas para a realização da correlação.

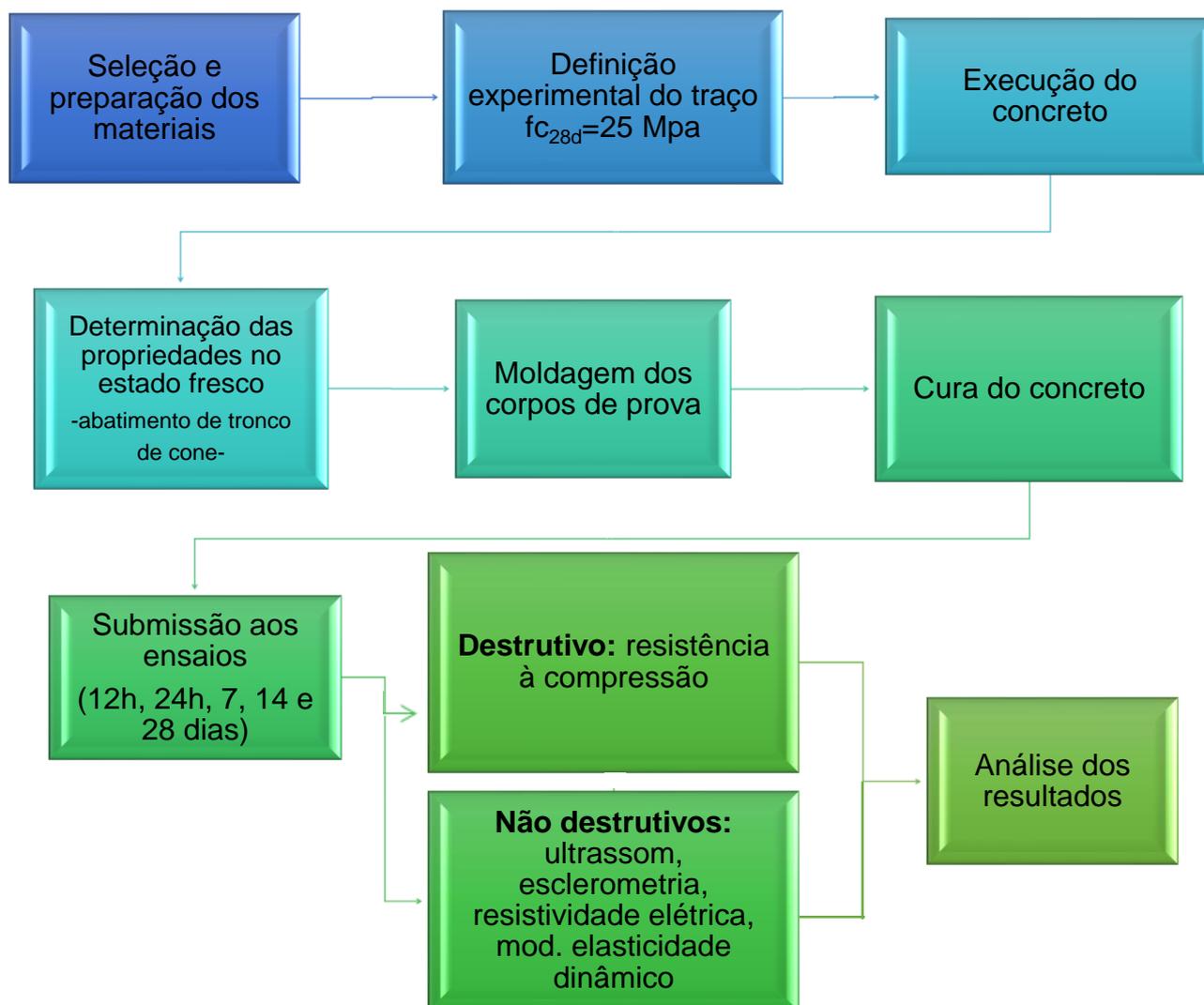
Panedpojaman e Tonnayopas (2018) conduziram um estudo com o intuito de investigar a variação da assertividade e confiabilidade, antes e após uma peça de concreto ser exposta à altas temperaturas (acima de 800°C, por períodos desconhecidos) na estimativa da resistência à compressão pelo ensaio de esclerometria. Além disso, para determinar os mecanismos pelos quais a temperatura elevada poderia afetar os resultados apurados por meio da esclerometria, estudos de difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) também foram realizados no concreto após aquecimento. Este estudo destaca-se no apoio a avaliações de segurança em relação à resistência à compressão de estruturas submetidas à incêndios, para decisões sobre reparos ou outras ações usando o método da esclerometria. Os autores concluíram que o ensaio de resistência à compressão forneceu resultados 40% mais seguros do que a estimativa obtida por meio do ensaio de esclerometria.

Deste modo, Panedpojaman e Tonnayopas (2018) afirmam que a resistência do concreto se relaciona à temperatura no núcleo do concreto, que é afetada pelo tamanho da viga e pelo tempo de aquecimento e que o teste de esclerometria reflete principalmente as propriedades do concreto nas superfícies ou próximo a elas. Por meio da difração de raios-X e da microscopia eletrônica de varredura, os autores concluíram que houve uma redução da porosidade do concreto o que conferiu uma maior dureza superficial afetando os resultados do ensaio de esclerometria. Portanto, a estimativa da resistência à compressão foi afetada, sendo que a estimativa de resistência após o incêndio foi maior do que os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão. Assim sendo, em situações específicas, como, quando os concretos são submetidos à incêndios o ensaio de esclerometria pode não ser um método assertivo na estimativa da resistência do concreto quando comparado ao ensaio destrutivo de resistência à compressão. No entanto, o ensaio de esclerometria, nestes casos, segundo os referidos autores, pode ser utilizado para comparar os danos ao concreto aquecido e estimar os picos de temperatura nas superfícies.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação da resistência à compressão do concreto via ensaios não destrutivos foi de natureza experimental. Foram preparados dois traços distintos de concreto: um traço de referência (CR) que teve como característica principal a adoção de 100% de cimento CPV-ARI e um segundo traço (CM) com substituição de 20%, em peso, de cimento por metacaulim. Esses concretos foram submetidos a ensaios no estado fresco e endurecido. No estado endurecido, os ensaios foram o de resistência à compressão uniaxial e diferentes ensaios não destrutivos. A Figura 9 abaixo mostra esquematicamente o procedimento experimental. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica, bem como no Laboratório de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais.

**Figura 9** - Etapas do trabalho experimental.



### 3.1 Materiais

Foram preparados dois diferentes concretos utilizando como aglomerantes: cimento CPV, do fabricante Holcim e metacaulim, do fabricante Metacaulim Brasil (Tab. 3). Como agregados foram utilizados brita gnaiss zero (massa específica igual a 2.764 kg/m<sup>3</sup>) e areia natural silicosa média (massa específica igual a 2.614 kg/m<sup>3</sup>), ambos secos ao natural e isentos de impurezas. A água utilizada foi potável, fornecida pelo sistema de abastecimento público (COPASA).

**Tabela 3** - Caracterização dos aglomerantes utilizados

Elementos	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial CPV ARI*	Metacaulim**
	% em peso	
SiO <sub>2</sub>	19,19	55,16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,15	37,88
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,80	2,64
CaO	63,33	0,05
MgO	0,92	0,84
SO <sub>3</sub>	2,82	0,04
CO <sub>2</sub>	2,78	-
K <sub>2</sub> O	0,77	0,85
TiO <sub>2</sub>	-	2,01
Na <sub>2</sub> O	-	0,19
Outros	0,48	0,8
<b>Outras características</b>		
Perda ao fogo (PF)	3,97	2,22
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	3,6	2,6
IAP - Chapelle modificado (Ca(OH) <sub>2</sub> (mg/g)***	-	844,4

Fonte: \*fornecido pelo fabricante Holcim. \*\* fornecido pela Geosol. \*\*\* determinado por Alvarenga (2018).

### 3.2 Métodos

Após a definição dos materiais e traços, foi confeccionado um concreto utilizando cimento Portland e outro com substituição de 20% do cimento por metacaulim que, conforme apresentado em diversos estudos, é um percentual de substituição que proporciona excelentes resultados em prol da durabilidade do concreto, principalmente a respeito das propriedades mecânicas como a resistência à compressão (WILD, KHATIB, JONES, 1996; NICHOLAS, CYR, ECADEILLAS, 2014; VANCE et al., 2013). Após a determinação das propriedades

no estado fresco os concretos foram moldados, curados e submetidos aos diferentes ensaios: resistência à compressão uniaxial; resistividade elétrica superficial, resistividade elétrica volumétrica; esclerometria; ultrassom e módulo de elasticidade dinâmico.

### 3.2.1 Definição experimental do traço e execução do concreto

O traço foi definido experimentalmente em função de uma resistência à compressão aos 28 dias ( $f_{c28}$ ) de 25 MPa. Além disso, determinou-se que fator água/aglomerante (a/c) deveria variar de 0,45 a 0,50 e ter um abatimento em seu estado fresco de 12 +/- 2 cm. Tais valores foram escolhidos baseados nas características de um concreto utilizado comumente em obras do sistema construtivo de paredes de concreto, uma vez que esse tipo de obra envolve a desforma rápida da estrutura, em 24 horas, o que seria compatível aos ensaios propostos nesse trabalho. De modo a proporcionar melhor trabalhabilidade foi adicionado aditivo plastificante Muraplast FK830 na proporção de 0,4% sobre o peso do cimento, em ambos os concretos. Os traços dos concretos encontram-se descritos na Tabela 4:

**Tabela 4** - Consumo de materiais por kg de cimento.

Tipo de concreto	Aglomerante		Areia	Brita	Fator a/c	Aditivo plastificante
	Cimento	Metacaulim				
CR	1,00	0,00	2,59	2,92	0,47	0,40
CM	0,80	0,20	2,59	2,92	0,47	0,40

A confecção dos concretos foi realizada no laboratório da empresa Viatest na cidade de Belo Horizonte – MG. Optou-se por fabricar o concreto e moldá-lo em uma temperatura ambiente que variasse entre 20 e 22°C tendo em vista que grande parte da literatura de referência estudada para este trabalho procedeu a fabricação em temperatura ambiente semelhante. Após a separação e pesagem dos materiais procedeu-se a confecção do concreto em betoneira, com a mistura do aglomerante e agregados e posteriormente a adição gradual de água e aditivo plastificante.

### 3.2.2 Propriedades no estado fresco

No estado fresco, determinou-se o abatimento de tronco de cone (*slump test*) de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998) para avaliar a trabalhabilidade dos concretos e identificar a influência dos aglomerantes neste aspecto reológico do concreto.

### 3.2.3 Moldagem e cura do concreto

Foram moldados 33 corpos de prova cilíndricos de 20 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro, para cada tipo de concreto. De forma a proporcionar qualidade na moldagem dos corpos de prova, em função do resultado dos *slumps* obtidos, foi necessário aplicar mais golpes com o bastão no concreto CM. Para a moldagem do concreto CR obedeceu-se a NBR 5738 (2015-6), tanto no número de golpes quanto no número de camadas, porém para a moldagem do concreto CM dobrou-se o número de golpes e manteve-se o número de camadas. Durante a moldagem, preocupou-se em nivelar a superfície superior do CP para que não fosse necessário o uso da retífica, apenas de lixamento na face que ficou externa à forma. Esses corpos de prova ficaram armazenados ao abrigo do sol, por 12 horas, em ambiente aberto, a uma temperatura que variou de 22° C até 26° C (Fig. 10).

**Figura 10** - Corpos de prova recém moldados.



Após as 12 horas, 9 unidades do concreto CR e 9 unidades do concreto CM foram desformados para submissão aos primeiros ensaios e os demais ficaram armazenados em suas formas.

Decorridas 24 horas pós moldagem, outros 9 corpos de prova de cada concreto foram desformados e submetidos imediatamente aos ensaios. Os demais corpos de prova foram desformados e armazenados para cura submersa em água potável até a idade de seus respectivos ensaios a uma temperatura que variou entre 20 a 23 °C. A adoção de cura submersa atuou de forma a dirimir as interferências climáticas do meio e proporcionar um ambiente melhor controlado. Para os ensaios nas idades de 7, 14 e 28 dias, os corpos de prova foram retirados da água com 24 horas de antecedência. A exceção à esta regra deveu-se aos corpos de prova que se submeteram aos ensaios de resistividade elétrica, pois estes permaneceram submersos em água e apenas foram retirados do ambiente saturado no momento do ensaio, sendo devolvidos à água logo após o ensaio conforme procedimento defendido por Lamounier, Pinto, Aguilar e Paulino (2014).

Após a desforma, todos os corpos de prova também foram pesados em uma balança hidrostática de precisão de 32 kg e medidos em relação às suas dimensões finais. A mesma medição foi repetida a cada idade de ensaios com os concretos que ainda não foram descartados pelo ensaio de rompimento à compressão axial.

Os corpos de prova foram nomeados de 1 a 33, precedidos das letras CM ou CR de forma a identificar seu traço. Na primeira etapa de testes (12 horas) os corpos de prova foram ensaiados sem lixamento, pois não estavam muito rígidos para tal atividade. Nos testes subsequentes utilizou-se apenas lixa d'água número 200 para pequenas regularizações superficiais nas amostras de forma a facilitar os ensaios de ultrassom, módulo de elasticidade, esclerometria e rompimento à compressão.

A escolha dos corpos de prova para cada teste deu-se de forma aleatória. A Tabela 5 apresenta a relação de ensaios, idades e corpos de prova. Observa-se que o corpo de prova CR2 foi descartado. Isso ocorreu, pois ele quebrou no momento da preparação para o teste de esclerometria.

**Tabela 5 -** Corpos de prova e seus respectivos ensaios em idades distintas.

Corpo de prova	Ensaio	Idade ensaiada	Corpo de prova	Ensaio	Idade ensaiada
CR1	esclerometria / romp. compressão	12h	CM1	esclerometria / romp. compressão	12h
CR2	descartado	-	CM2	esclerometria / romp. compressão	12h
CR3	esclerometria / romp. compressão	12h	CM3	esclerometria / romp. compressão	12h
CR4	esclerometria / romp. compressão	12h	CM4	ultrassom / mód elasticidade	12 h
CR5	ultrassom / mód elasticidade	12 h	CM5	ultrassom / mód elasticidade	12 h
CR6	Esclerometria / romp. compressão	24 h	CM6	ultrassom / mód elasticidade	12 h
CR7	ultrassom / mód elasticidade	12h	CM7	resistividade superficial / volumétrica	todas as idades
CR8	mód de elasticidade	12 h	CM8	resistividade superficial / volumétrica	todas as idades
CR9	resistividade superficial / volumétrica	todas as idades	CM9	resistividade superficial / volumétrica	todas as idades
CR10	resistividade superficial / volumétrica	todas as idades	CM10	ultrassom / mód elasticidade	24 h
CR11	ultrassom / mód elasticidade	24 h	CM11	ultrassom / mód elasticidade	24 h
CR12	esclerometria / romp. compressão	24 h	CM12	ultrassom / mód elasticidade	24 h
CR13	ultrassom / mód elasticidade	24 h	CM13	esclerometria / romp. compressão	24 h
CR14	esclerometria / romp. compressão	24 h	CM14	esclerometria / romp. compressão	24 h
CR15	ultrassom / mód elasticidade	24 h	CM15	esclerometria / romp. compressão	24 h
CR16	esclerometria / romp. compressão	7 dias	CM16	esclerometria / romp. compressão	7 dias
CR17	esclerometria / romp. compressão	7 dias	CM17	esclerometria / romp. compressão	7 dias
CR18	esclerometria / romp. compressão	7 dias	CM18	esclerometria / romp. compressão	7 dias
CR19	ultrassom / mód elasticidade	7 dias	CM19	ultrassom / mód elasticidade	7 dias
CR20	esclerometria	após 28 dias	CM20	ultrassom / mód elasticidade	7 dias
CR21	ultrassom / mód elasticidade	7 dias	CM21	ultrassom / mód elasticidade	7 dias
CR22	ultrassom / mód elasticidade	12 horas / 7 dias	CM22	esclerometria / romp. compressão	14 dias
CR23	ultrassom / mód elasticidade	14 dias	CM23	esclerometria / romp. compressão	14 dias
CR24	ultrassom / mód elasticidade	14 dias	CM24	esclerometria / romp. compressão	14 dias
CR25	ultrassom / mód elasticidade	14 dias	CM25	ultrassom / mód elasticidade	14 dias
CR26	esclerometria / romp. compressão	14 dias	CM26	ultrassom / mód elasticidade	14 dias
CR27	esclerometria / romp. compressão	14 dias	CM27	ultrassom / mód elasticidade	14 dias
CR28	esclerometria / romp. compressão	14 dias	CM28	esclerometria	após 28 dias
CR29	esclerometria	após 28 dias	CM29	esclerometria	após 28 dias
CR30	esclerometria	após 28 dias	CM30	esclerometria	após 28 dias
CR31	ultrassom / mód elast. / romp. compressão	após 28 dias	CM31	ultrassom / mód elasticidade / romp. compressão	após 28 dias
CR32	ultrassom / mód elast. / romp. compressão	após 28 dias	CM32	ultrassom / mód elasticidade / romp. compressão	após 28 dias
CR33	ultrassom / mód elast. / romp. compressão	após 28 dias	CM33	ultrassom / mód elasticidade / romp. compressão	após 28 dias

### 3.2.4 Propriedades no estado endurecido

Os concretos foram submetidos ao ensaio de resistência a compressão uniaxial e diferentes ensaios não destrutivos.

#### 3.2.4.1 Resistência à compressão uniaxial

Os concretos foram testados pelo ensaio à compressão segundo a NBR 5.739 (ABNT, 2018). Para tanto, foram ensaiados três corpos de prova distintos de cada traço (Tabela 5), em cada idade (12 horas, 24 horas, 7, 14 e 28 dias), que anteriormente foram examinados por ensaios não destrutivos. Foi utilizada uma prensa hidráulica EMIC modelo PC200.

#### 3.2.4.2 Ensaio não destrutivos

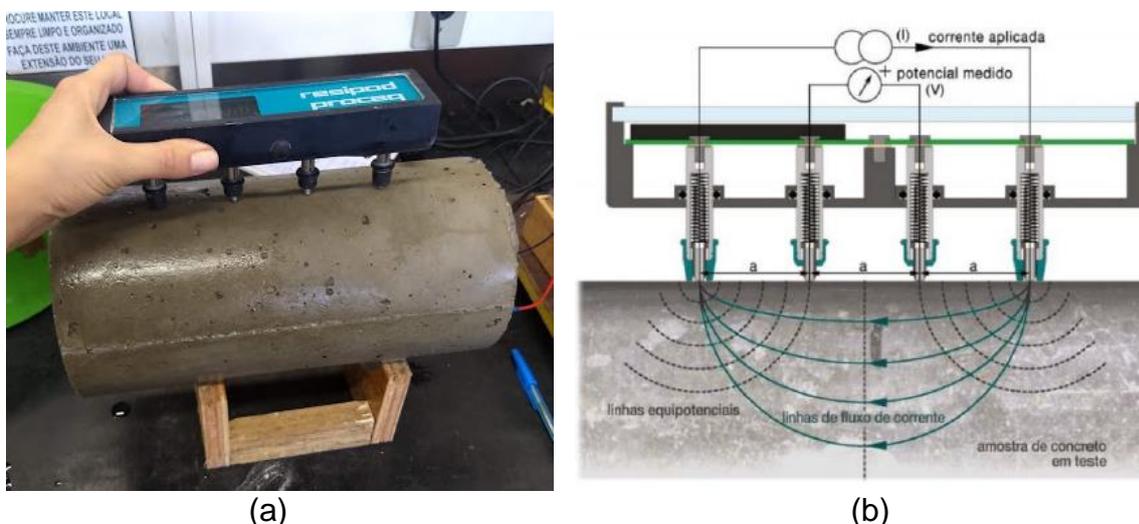
Os ensaios não destrutivos realizados neste trabalho foram: resistividade elétrica superficial, resistividade elétrica volumétrica, esclerometria, ultrassom e módulo de elasticidade frequência ressonante.

##### *Resistividade elétrica superficial*

O ensaio de resistividade elétrica superficial foi realizado conforme a norma UNE 83988-2 (ESPANHA, 2014). Foi utilizado um resistímetro modelo Resipod da marca Proceq (Fig. 11a) que segue o princípio do método Wenner ou método dos quatro eletrodos.

As medições foram feitas com eletrodos posicionados a uma distância equidistante de 5 cm uns dos outros e aos resultados foi aplicado um fator de forma de 0,377 (estabelecido pela norma UNE 83988-2), para que os dados obtidos fossem adaptados ao corpo de prova cilíndrico de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento, não alterando os valores da resistividade elétrica obtido nas leituras com o equipamento (Fig. 11b) (GODINHO et al., 2018; PROCEQ, 2019).

**Figura 11** - Aparelhagem para a medição da resistividade elétrica do concreto:  
 a) Resipod. b) princípio de medição pelo método de Wenner.



Fonte: (a) Acervo da autora, 2020. (b) Adaptado de Proceq, 2019.

Os dados apresentados pelo aparelho Resipod foram analisados pela média das leituras dos três corpos de prova em cada idade de cada tipo de concreto e foi calculada a resistividade elétrica superficial ( $\rho_s$ ).

### *Resistividade elétrica volumétrica*

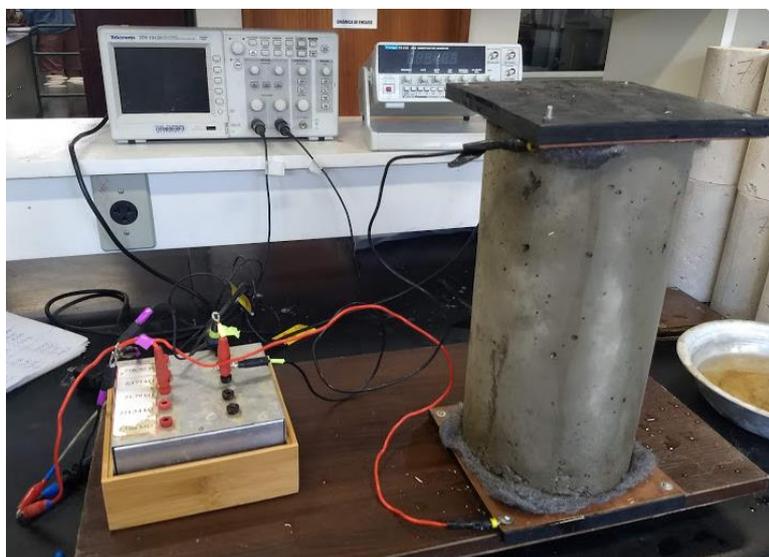
Para a determinação da resistividade elétrica volumétrica ( $\rho_v$ ) dos concretos foi utilizado um equipamento desenvolvido por Lamounier, Pinto, Aguilar e Paulino (2014). Este equipamento consiste no método de duas pontas, e utiliza-se dois eletrodos (chapas de cobre) que são posicionados nas duas extremidades do corpo de prova. Para facilitar o contato e entre a superfície do concreto e da placa utiliza-se uma lã de aço úmida (Fig. 12). A técnica consiste em direcionar uma corrente alternada, a uma frequência estabelecida, por meio de um banco de resistências. Um osciloscópio faz a leitura da corrente que passe de um eletrodo a outro e avaliam-se os resultados informados de quedas dos potenciais entre os eletrodos. Para o ensaio em questão foi utilizado o osciloscópio marca Tektronix, modelo TDS1012B3.

Enquanto que no Resipod (resistividade superficial) a variação da corrente foi ajustada automaticamente pelo próprio equipamento, no caso da resistividade volumétrica manteve-se corrente constante e nas diferentes idades teve-se que ajustar a tensão de entrada para que fosse aferida a tensão de saída. Nas primeiras

24 horas utilizou-se a faixa de 10V, 5V aos 7 dias, 2V aos 14 dias e 1V aos 28 dias. Este ajuste se fez necessário para que as leituras pudessem ser apresentadas pelo osciloscópio, na medida em que a resistividade foi aumentando no passar do tempo.

Para a determinação dos valores resistividade elétrica do concreto, os dados apresentados no osciloscópio foram tratados e utilizou-se o cálculo preconizado pela NBR 9.204 (ABNT, 2012). A norma espanhola UNE 83988-1 (2008) também foi consultada, sobretudo a respeito das correções em função da dimensão do corpo de prova.

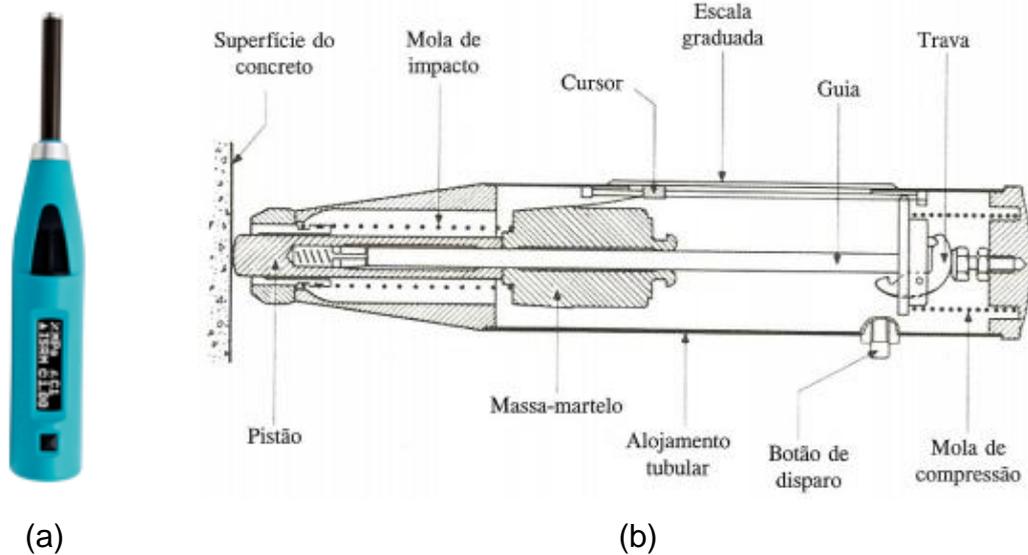
**Figura 12** - Sistema de medição de resistividade volumétrica por chapas de cobre e eletrodos utilizado no laboratório de Materiais de Construção da UFMG.



### *Índice Esclerométrico*

Os ensaios de esclerometria foram realizados utilizando o equipamento portátil esclerômetro modelo tipo Schmidt (PROCEQ, 2019) (Fig. 13a e 13b). Para a realização dos ensaios os corpos de prova foram apoiados em uma superfície plana e travados entre os pés do aplicador (Fig. 14).

**Figura 13** - a) Esclerômetro Schmidt. b) Seção longitudinal do esclerômetro.



Fonte: a) Proceq, 2019. b) Castro, 2009.

**Figura 14** - Ensaio de esclerometria.



A NBR 7.584 (ABNT, 2012) determina que, para ensaios em peças concretadas, a quantidade de golpes deve ser de 16 golpes em uma área de impacto respeitando o distanciamento de 30 mm entre cada golpe. Além disso deve-se evitar aplicar golpes em locais menos de 50 mm da extremidade da peça

concretada. Deve-se calcular a média aritmética desses impactos e aqueles que obtiverem resultados afastados em 10% dos valores da média final devem ser descartados.

Observado a referida norma, a área mínima de testes a ser utilizada deveria ser de 361 cm<sup>2</sup>. Contudo, os corpos de prova têm em suas extremidades área inferior e o seu eixo longitudinal está exatamente a 50mm equidistante de suas extremidades. Optou-se, portanto, em adaptar esta técnica, aplicando apenas um golpe no eixo do corpo de prova. A título de comprovação da pequena variabilidade de se aplicar esse golpe em outro local da face superior do corpo de prova, foi dado um segundo golpe a 30 mm equidistante do eixo e percebeu-se a variação de menos de 10% no resultado do impacto.

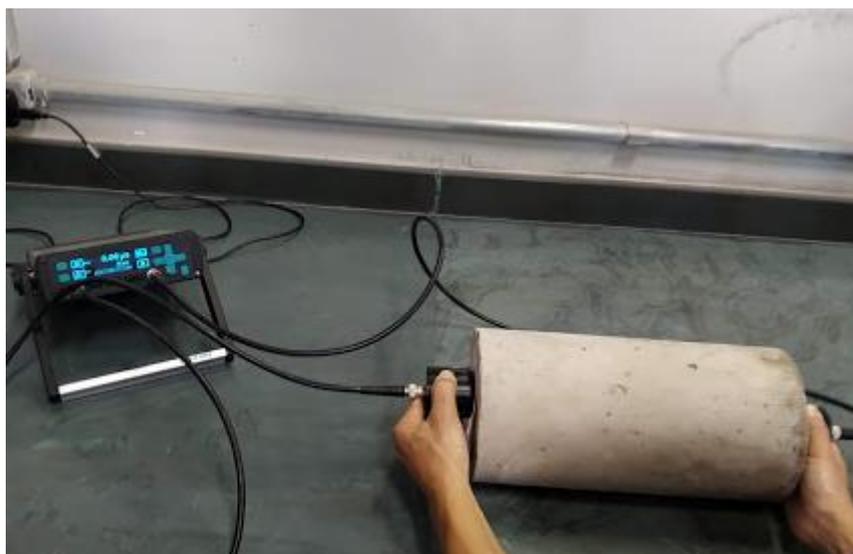
Os índices esclerométricos (Q) apresentados pelo aparelho Esclerômetro de Schmidt foram obtidos pela média dos três corpos de prova em cada idade de cada tipo de concreto.

#### *Velocidade de propagação de pulso ultrassônico*

Os ensaios de propagação do pulso ultrassônico foram realizados com a aplicação dos transdutores por transmissão direta devido ao formato dos corpos de prova permitirem esta forma de ensaio. Panzera *et al.* (2011) defendem o ensaio por transmissão direta por ser o que apresenta melhor sensibilidade.

Neste ensaio aferiu-se a velocidade da propagação do pulso ultrassônico em função da distância percorrida. Para o ensaio ultrassom foi utilizado um aparelho digital modelo Ultrasonic Pulse Velocity Pundit Lab da marca Proceq (Fig. 15). Como acoplante dos transdutores foi utilizado gel. As leituras foram realizadas por transmissão direta, com três leituras por corpo de prova, sendo três corpos de prova de cada concreto, em cada idade, conforme orientação do fabricante do aparelho e da ABNT NBR 8802 (ABNT, 2019).

**Figura 15** - Aparelho Pundit Lab - Proceq.



Para a definição da velocidade de pulso ultrassônico ( $v$ ) em cada idade foram consideradas a média simples das leituras por cada corpo de prova e posteriormente a média simples dos três corpos de prova.

#### *Módulo de elasticidade dinâmico*

O módulo de elasticidade dos concretos foi definido pela aplicação de frequência ressonante forçada e foi utilizado o aparelho Erudite MKII Resonant Frequency Test System, da C.N.S. Electronics (Fig. 16).

**Figura 16** – Aparelho Erudite MKII para aplicação de frequência ressonante.



Os ensaios de frequência ressonante forçada, no modo longitudinal, foram executados baseado nas normas C 215 (ASTM, 2008) e BS 1881: Part 209 (BSI, 1990). Neste ensaio as amostras sofreram vibração por meio de uma unidade motriz eletromecânica até atingir a sua amplitude máxima, quando a frequência de vibração se iguala à frequência natural da amostra, sendo esse o valor da frequência ressonante ( $F_r$ ).

Para a definição do módulo de elasticidade foi utilizada a Eq. 15, proposta pelo manual do equipamento Erudite MKII (1995), com a média dos resultados de três corpos de prova, medidos por três vezes em cada idade, de cada tipo de concreto.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Propriedade no estado fresco

Durante o ensaio de *slump test* observou-se que o concreto CM obteve abatimento de 8 cm, enquanto que o concreto CR obteve 12 cm. Esta diferença teve significativa influência na moldagem dos CPs, pois durante a moldagem dos corpos de prova do concreto CM houve a necessidade de aumentar a quantidade de golpes dada a maior dificuldade em adensar o concreto apenas com a quantidade de golpes regulares preconizados pela NBR 5738 (2016), que é de dez golpes por camada.

Esta influência na trabalhabilidade é explicada por Garcia, Vargas e Castellanos (2020), bem como Muduli e Mukharjee (2019), afirmando que o metacaulim é um material de comportamento pozolânico, altamente ativo e por isso afeta negativamente a diluição da pasta cimentícia, exigindo uma maior quantidade de água e/ou um aditivo superplastificante. O acréscimo de mais água na mistura seria desfavorável para a resistência à compressão do concreto (CASSAGNABÈRE et al., 2013). Contudo Muduli e Mukharjee (2019) explicam que, embora exista esse efeito inicial na mistura, ele é compensado na fase de hidratação do concreto nas primeiras idades, pois o metacaulim remove do sistema a o hidróxido de cálcio, acelerando o processo de hidratação do cimento, fazendo com que ele ganhe resistência a compressão em patamares mais altos se comparado a um concreto sem substituição.

Com o dobro do número de golpes houve a preocupação quanto à ocorrência de segregação dos agregados, fato que ocorre em situações de vibração excessiva do concreto (NAVARRETE; LOPEZ, 2016). De forma a verificar essa ocorrência, com o concreto ainda fresco, desmoldou-se um corpo de prova e essa segregação não foi observada. Percebeu-se que, embora o metacaulim tornasse o concreto mais viscoso, a homogeneidade do concreto no estado fresco não foi comprometida.

Após a desforma dos corpos de prova (12 horas após a moldagem), constatou-se também que não houve a segregação e as amostras apresentaram característica visual semelhante aos corpos de prova CR, sem brocas ou segregações. Isto também pôde ser comprovado na matriz interna do concreto, onde percebe-se que o concreto ficou homogêneo na distribuição dos agregados com a argamassa nos dois tipos de concreto (Figura 17).

**Figura 17** – a) matriz interna de um corpo de prova CM submetido à compressão axial, às 12h pós mistura. b) demais corpos de prova rompidos às 12 horas pós mistura.



Ainda sobre a matriz interna do concreto CM, observou-se a presença de torrões de metacaulim indicando que não houve completa dissolução deste material suplementar na argamassa (Fig. 18). Para que isso não ocorresse o tempo de mistura do concreto CM poderia ter sido maior que o concreto CR conforme sugerido por Raad (2008) e Nogueira (2015), ou até mesmo ter sido adicionado um maior teor de aditivo plastificante conforme estudos de Siddique e Klaus (2009) bem como Abellán-García et al. (2020). Porém optou-se, durante o desenvolvimento da metodologia de pesquisa, em não alterar mais nenhum componente do traço se comparado ao concreto CR, nem na forma de produção dos concretos (tempo de mistura), pois os demais resultados dos ensaios no estado endurecido poderiam ser também afetados. Portanto, estes mesmos resultados limitaram-se à influência da substituição parcial do concreto por metacaulim.

**Figura 18** - Pontos de metacaulim que não se misturaram ao concreto. Imagem de rompimento aos 14 dias pós moldagem.



Tem-se, então, o primeiro resultado deste estudo experimental, a respeito de algumas propriedades reológicas, comparando-se o concreto CM com o concreto CR: a) trabalhabilidade: o concreto com substituição parcial por metacaulim teve a sua trabalhabilidade dificultada em relação ao CR; e b) integridade da massa de concreto: no teor de 20% de substituição do cimento por metacaulim não houve segregação, e ambos os concretos se apresentaram uniformes após desforma.

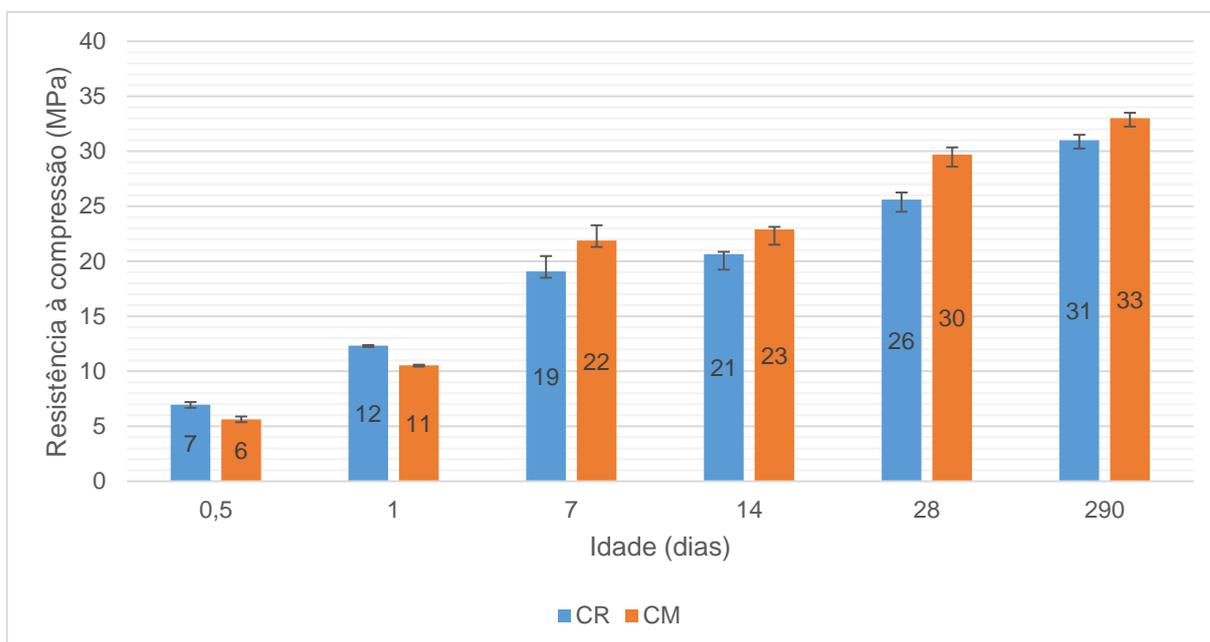
#### **4.2 Resistência à compressão uniaxial do concreto**

A Figura 19 apresenta os resultados médios bem como a amplitude de variação dos valores medidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial dos dois concretos estudados, em diferentes idades. Observa-se, como descrito na literatura (NEVILLE, 2011), o crescimento monotônico da resistência à compressão das amostras. O concreto composto por 100% de CPV alcançou o  $F_{C12}$  de 7 MPa e às 24 horas esse valor aumentou 171% (12 Mpa). Aos sete dias o concreto atingiu 19 MPa e a partir de então, a resistência tendeu a crescer lentamente atingindo aos 28 dias, 26 MPa, e aos 290 dias, 31 MPa. Dessa forma, verifica-se que o concreto de

referência apresenta um comportamento típico de um concreto CPV conforme NBR 16.697 (ABNT, 2018).

De forma similar ao concreto de referência, observa-se no concreto com a substituição parcial do cimento em 20% de metacaulim um crescimento acentuado da resistência nas primeiras horas de cura: o concreto com metacaulim apresentou, após 12h de idade, um  $F_{cj}$  médio de 6 MPa, tendo seu valor aumentado em 183% (11 Mpa) após 24 horas de cura. Resultado semelhante foi obtido por Muduli e Mukharjee (2019), bem como Khatib (2008). Observa-se, assim, nessas primeiras idades de cura, que a resistência dos concretos é praticamente a mesma. De acordo com Singh e Singh (2016) isto ocorre, pois nos primeiros sete dias o metacaulim age mais como efeito fíler do que como pozolana. Os autores defendem que o avanço no ganho de resistência à compressão nessas primeiras idades deve-se puramente às reações de hidratação do cimento.

**Figura 19** - Resultados médios e amplitude de variação dos valores medidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial do concreto de referência (CR) e do concreto com metacaulim (CM).



A partir dos sete dias observa-se uma tendência de aumento da resistência do concreto com metacaulim em relação ao concreto de referência e esta tendência permanece nas idades posteriores. Este fato também é observado em outros estudos como os realizados por Muduli e Mukharjee, 2019; Wild, Khatib e Jones, 1996; Kathib,

2008, Zenisek, Vlach e Laiblová, 2016; Vicentini, Câmara e Tashima, 2016; Schmidt e Allem, 2016; assim como Teodoro *et al.*, 2018.

No período que inicia por volta do 7º dia até o 14º dia de idade, há maior ativação do metacaulim, que consome o hidróxido de cálcio (CH) advindo dessa hidratação do cimento, produzindo fases adicionais de aluminatos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Siddique e Klaus (2009) complementam que o metacaulim em idades posteriores também reage com o hidróxido de cálcio e gerando CSH gel.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), são fatores de influência na resistência do concreto as características e proporções dos materiais, as condições de cura e os parâmetros de ensaio. No caso deste estudo as amostras estiveram sob mesma condição de cura e mesmos parâmetros de ensaio, o que leva a análise sob a perspectiva das características e proporções dos materiais. Em ambos os traços se variou apenas o aglomerante, indicando que essa diferença de resistência entre os concretos se deve à atuação do metacaulim durante o processo de desenvolvimento dos cristais na fase de hidratação do concreto.

Khatib (2008) estudou diferentes porcentagens de substituição de metacaulim por cimento e constatou que o efeito máximo da pozolana no aumento da resistência do concreto por ação do metacaulim ocorreu entre o sétimo e o décimo quarto dia. Por sua vez, Qian e Li (2001), bem como Siddique e Klaus (2009) defendem o aumento dessas propriedades de forma significativa até os 90 dias pós moldagem, podendo ir até mais de um ano. Esse aumento pode ser percebido neste estudo, pois aos 290 dias os valores obtidos continuaram crescentes.

Do mesmo modo, analisando a Figura 19 de forma global chega-se ao entendimento que a substituição parcial do cimento por metacaulim em 20%, embora tenha apresentado resultados superiores ao do concreto de referência a partir do 14º dia, não alterou significativamente a resistência à compressão, com uma diferença máxima absoluta de 4 MPa, demonstrando que ambos os concretos obtiveram comportamentos semelhantes, também observado por Singh e Singh (2016), Muduli e Mukharjee (2019), bem como Garcia, Vargas e Castellanos (2020) em seus estudos. Estes últimos autores defendem que a porcentagem de substituição de 15% de metacaulim teria melhor resultado no desejo de aumentar a resistência à compressão do concreto ao invés de 20% e, embasados pelos estudos de Menéndez *et al.* (2003), sugerem que isso deve-se possivelmente à diluição maior do clínquer nesta

proporção. Investiga-se, a seguir se este comportamento é também observado nos resultados dos ensaios não destrutivos propostos por esta pesquisa.

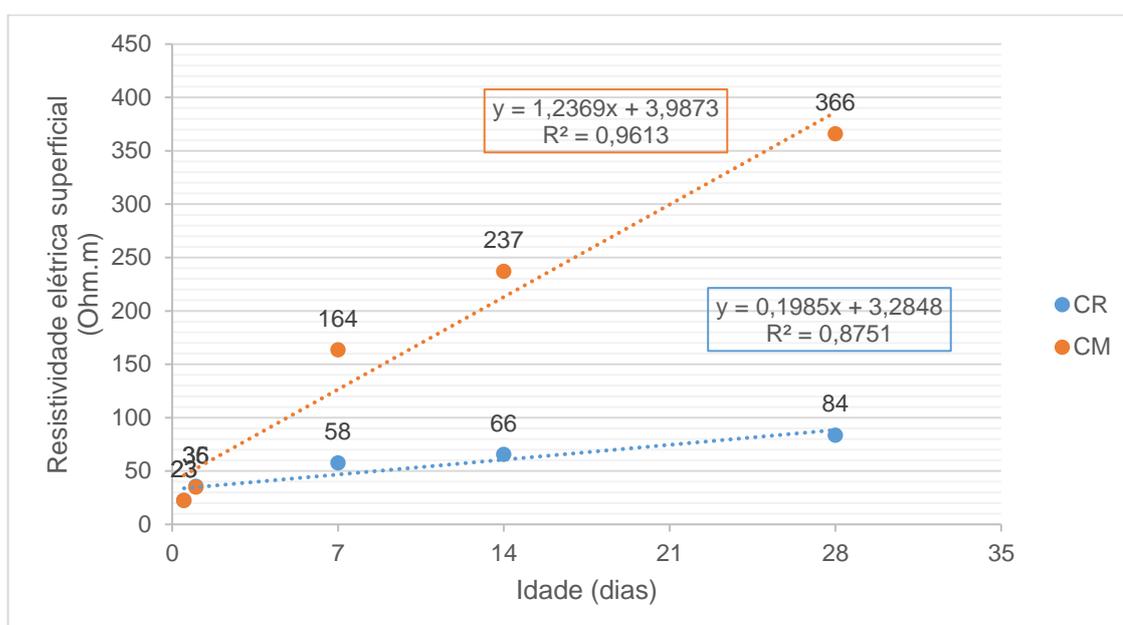
Buscando utilizar estes resultados acadêmicos quanto à sua contribuição às práticas das construções, retoma-se a análise desse resultado quanto à sua aplicação em uma estrutura de uma edificação multifamiliar em área urbana (classe II de agressividade ambiental) onde pretende-se a desforma decorridos 24 horas pós moldagem. De acordo com a NBR 6.118 (ABNT, 2014), para essa classe de agressividade, os valores obtidos pelos dois concretos estariam conformes, permitindo a desforma.

### 4.3 Resistividade Elétrica

#### 4.3.1 Resistividade elétrica superficial

A evolução da resistividade elétrica superficial nas respectivas idades e nos concretos CM e CR são apresentados na Figura 20.

**Figura 20** - Resultados médios dos valores medidos nos ensaios de resistividade elétrica superficial do concreto de referência (CR) e do concreto com metacaulim (CM).



Pela análise da Figura 20 observou-se crescimento monotônico da resistividade elétrica em ambos os concretos. Nos primeiros ensaios, às 12 e 24 horas pós moldagem constatou-se pouco distanciamento entre os concretos: CM, que obteve, respectivamente, 23  $\Omega\text{m}$  e 35  $\Omega\text{m}$ ; e o concreto CR, que obteve 23  $\Omega\text{m}$  e 36  $\Omega\text{m}$ , respectivamente. O fato da obtenção de resultados tão próximos deve-se à grande presença de água no concreto que ainda não foi utilizada no processo de hidratação do cimento; o concreto saturado funciona como condutor, ou seja, pouco resistivo, diferente de quando está em estado seco conforme preceituado por Helene (1993) e constatado também por Lencioni e Lima (2010), Perez (2015) e Silva (2016), dentre outros estudos. Este resultado indica que ensaios de resistividade elétrica superficial em idades tão precoces (12/24 horas) possivelmente não trarão resultados que destaquem as características provenientes dos materiais constituintes de diferentes concretos.

Contudo, a partir do 7º dia, o resultado do concreto com metacaulim adquiriu um expressivo distanciamento do concreto CR e isso se repetiu nas idades superiores. Aos 7 dias, o concreto CM foi superior em 280%, aos 14 dias, superior em 359% e aos 28 dias 436% em relação ao CR.

Luco, Andrade e Climent (2012) testaram concretos sem adições minerais com resistências entre 20 e 60 MPa aos 28 dias de forma a observar o avanço da cura nestes concretos por meio da resistividade superficial e da perda de massa durante o período de hidratação. Os autores apresentaram evolução da resistividade superficial medida semelhantes ao concreto CR.

Teodoro (2016) conduziu um estudo em concretos com três diferentes tipos de metacaulim, um deles considerado de alta reatividade, com substituição parcial do cimento em 10% em massa. O pesquisador obteve, aos 91 dias, resultados de resistividade elétrica superficial superiores nos concretos com metacaulim se comparados ao concreto sem substituição na ordem de 260% com um fator água/aglomerante de 0,40. Para um fator água/aglomerante 0,60 os concretos com metacaulim foram mais resistivos na ordem de 297% em relação ao concreto sem substituição parcial por metacaulim. O grande distanciamento entre os resultados de resistividade elétrica superficial em concretos com substituição parcial por metacaulim e concretos sem adição ou substituição também puderam ser observados por Azzi (2020) bem como Schmidt e Allem (2016).

De acordo com Teodoro (2016) este fato é explicado por dois fatores: conforme apresentado no estudo proposto pelo autor, o índice de porosidade dos concretos com metacaulim foi menor, bem como o diâmetro menor desses poros, se comparados ao concreto de referência e, portanto, esses poros menores agiram como uma barreira física à passagem de corrente elétrica no concreto. Além disso o autor destaca que nos concretos com metacaulim a difusão iônica é afetada na solução aquosa dos poros do concreto, pois o metacaulim consome parte dos íons durante as reações pozolânicas, sobretudo os íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , que possuem valores de condutividade elétrica bastante expressivos. Sustentado pelos resultados de Ribeiro e Cunha (2014), o autor complementa que os metacaulins estudados possuíam um menor teor de álcalis (íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ) que o cimento Portland, diminuindo assim, também, a concentração iônica na solução aquosa nos poros do concreto, o que tornou o concreto com metacaulim mais resistivo.

Continuando a análise pelo âmbito da porosidade, em grande parte dos estudos de resistividade elétrica, a verificação da presença de poros ou capilares na matriz do concreto tem como objetivo prever a facilidade de o concreto armado sofrer ataques químicos externos, que resultam em processos corrosivos em sua armadura. De acordo com a Tabela 2 (item 2.5.1, neste trabalho) os resultados de resistividade medidos aos 28 dias indicam que tanto o concreto CR quanto o CM podem ser classificados em risco baixo de corrosão.

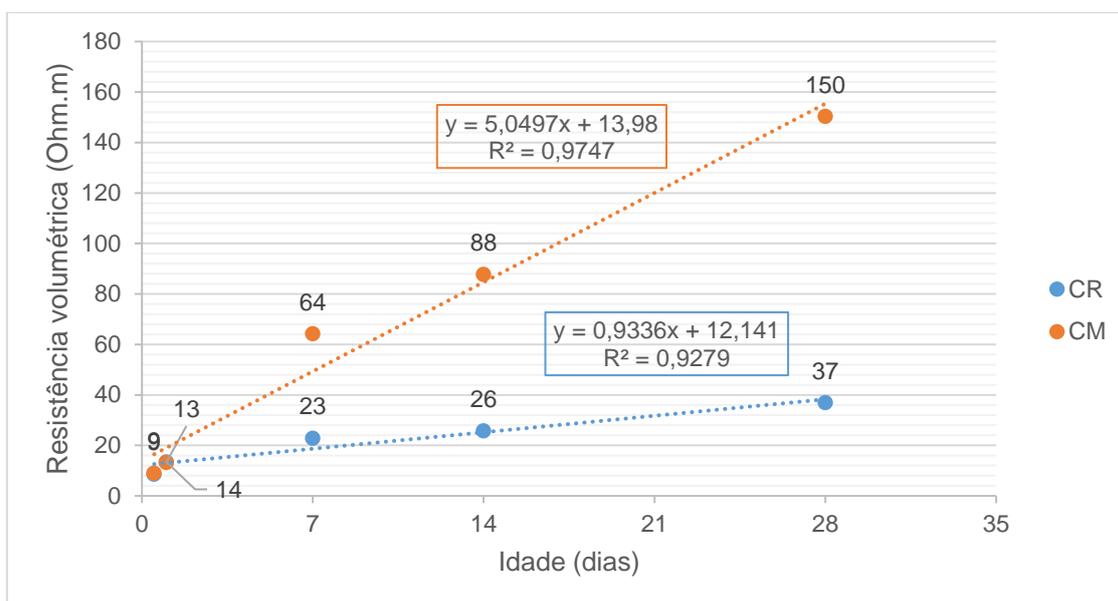
A presença de menor ou maior porosidade pode ser um indicativo de resistência mecânica, pois segundo Mehta e Monteiro (2014) a presença elevada de poros e/ou capilares afeta negativamente a resistência à compressão dos concretos. É devido a esta característica que diversas pesquisas buscam também correlacionar os resultados de resistividade elétrica à evolução desta propriedade mecânica, o que será visto mais à frente. Antes apresenta-se os resultados de resistividade elétrica volumétrica para a continuidade da investigação do comportamento dos concretos frente aos ensaios não destrutivos.

#### 4.3.2 Resistividade elétrica volumétrica

Enquanto a resistividade superficial verifica a passagem de corrente elétrica pelo concreto entre as pontas dos quatro eletrodos que estão sobre a lateral de um

corpo de prova cilíndrico, a resistividade volumétrica inspeciona o concreto no sentido longitudinal, passando a corrente elétrica pelo método de duas pontas, com eletrodos acoplados na superfície superior a inferior do concreto, de forma que essa corrente se distribua por todo o corpo de prova. A evolução das leituras de resistividade elétrica volumétrica nas respectivas idades e nos concretos CM e CR são apresentados na Figura 21.

**Figura 21** - Resultados médios dos valores medidos nos ensaios de resistividade elétrica volumétrica do concreto de referência (CR) e do concreto com metacaulim (CM).



Assim como no ensaio de resistividade superficial observou-se crescimento monotônico da resistividade elétrica em ambos os concretos. Nos primeiros ensaios, às 12 e 24 horas pós moldagem foi observado pouco distanciamento entre os concretos: CM, que obteve, respectivamente, 9  $\Omega\text{m}$  e 13  $\Omega\text{m}$  e o concreto CR, que obteve 9  $\Omega\text{m}$  e 14  $\Omega\text{m}$ , respectivamente. Observa-se, neste ensaio também, que a presença de água que ainda não foi utilizada no processo de hidratação do cimento fez com que não houvesse distinção entre os dois resultados dos diferentes traços nas idades mais recentes.

Seguindo a mesma tendência do ensaio anterior, a partir do 7º dia, o resultado do concreto com metacaulim distanciou-se do concreto CR bem como nas idades superiores. Aos 7 dias, o concreto CM foi superior em 278%, aos 14 dias, superior em 338% e aos 28 dias 405% em relação ao CR. Observou-se também que os resultados

de resistividade volumétrica possuem valores absolutos menores que os de resistividade elétrica superficial em todas as idades nos dois tipos de concreto, resultados também observados por Costa e Azzi (2017), Lage (2018) bem como Diniz (2018).

Lage (2018) realizou um estudo da resistividade elétrica em concretos fabricados com cimentos CP II a CP V, com fator água/aglomerante 0,60. A resistividade volumétrica do concreto CPV entre o 3º e 28º dia de idade teve evolução semelhante ao apresentado neste estudo pelo concreto CR, com resultado na ordem de 554% aos 28 dias. O autor destacou que entre os concretos estudados, aquele que teve menor variabilidade entre os resultados foi o concreto com cimento CPV.

Zaccardi e Di Maio (2014) conduziram ensaios com 4 tipos de concreto, utilizando cimento equivalente ao CPI, variando o fator água/aglomerante e adicionando um aditivo superplastificante em variada proporção de forma a obter valores de abatimento semelhantes. Além das medidas de resistividade elétrica volumétrica, os autores realizaram a avaliação do índice de porosidade das amostras e observaram que os concretos mais porosos obtiveram leituras de resistividade volumétrica inferiores. Para os concretos com fator água aglomerante 0,45 e 0,50, números próximos ao executado nesta pesquisa, o concreto atingiu, aos 28 dias, 107  $\Omega\text{m}$  e 128  $\Omega\text{m}$ , respectivamente, com uma porosidade medida média de 8,9%.

Ao avaliar concretos com substituição parcial por metacaulim, Shekarchi et al. (2010) concluíram que, ao substituir 15% em massa do cimento CII por metacaulim, os resultados de resistividade elétrica apresentaram a proporção de 450% superior ao concreto de referência aos 28 dias de idade. Ensaios de penetração de gases de nitrogênio (RILEM TC - 116) e água também foram realizados, apresentando uma redução na ordem de 50% no concreto com 15% de substituição por metacaulim, o que indicou também menor volume e tamanho de poros, bem como conexão entre poros.

#### **4.4 Módulo de elasticidade**

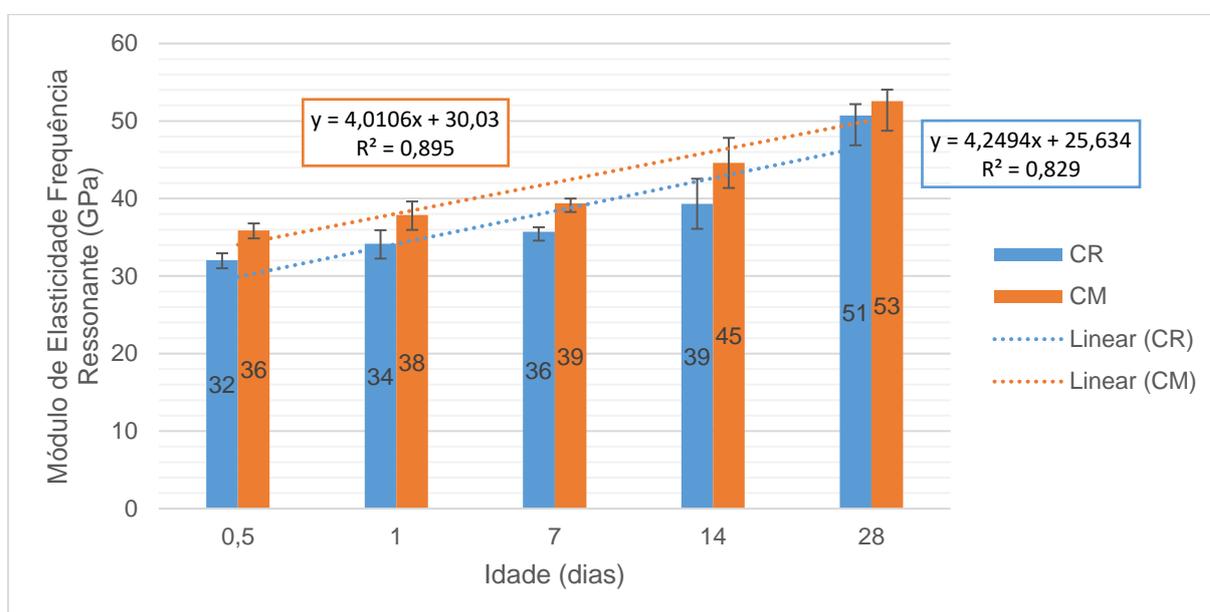
Neste trabalho, foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada, e foi calculado, por meio de uma equação apresentada na NBR

6.118 (ABNT, 2014), o módulo de elasticidade estático, utilizando os resultados dos ensaios de resistência à compressão.

#### 4.4.1 Módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada

Os valores medidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada, durante a evolução da hidratação do concreto, são apresentados na Figura 22.

**Figura 22** - Resultados médios e amplitude de variação dos valores medidos nos ensaios de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada nas diferentes idades.



Observa-se que ambos os concretos apresentaram evolução monotônica dos valores. O concreto CR, nos primeiros 14 dias, apresentou evolução na ordem de 2-3 GPa de aumento em cada idade medida. Embora aos 28 dias o valor do módulo seja 130% a mais que o resultado do 14º dia, observa-se certa linearidade no desenvolvimento desta propriedade, com uma média de 1,7 GPa de aumento por dia.

A evolução do concreto com metacaulim teve algumas particularidades, apresentando valor absoluto ligeiramente maior do que o concreto CR em todas as idades, diferente dos resultados medidos pelo ensaio de resistência à compressão axial, onde os valores absolutos do concreto CM foram superiores ao CR somente após o 7º dia. Além disso, até a terceira medição (7 dias) os valores obtidos estiveram

diferenciados em cerca de 2 GPa, porém, um intervalo maior de valores foi evidenciado do 7º para o 14º dia e também para o 28º dia, de 39 GPa para 45 GPa e posteriormente para 53 GPa, período em que as reações pozolânicas estiveram mais ativas. Este resultado é um indicativo de que, como o concreto CM apresentou maior módulo de elasticidade, houve melhora da rigidez em relação ao concreto de referência como observado também por Gomes (2015) e Azzi (2020). Pode-se supor que esta diferenciação no valor do módulo de elasticidade foi devido à pozolanicidade e pelo efeito fíler do metacaulim, apresentando uma tendência de crescimento superior ao concreto apenas com cimento CPV, a medida em que suas idades avançavam.

O estudo de Lage (2018), citado anteriormente a respeito das resistividades elétricas, contribui para a avaliação dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico, pois as mesmas amostras de concreto CPV avaliadas pelo autor foram submetidas aos ensaios de frequência ressonante forçada. O concreto avaliado pelo autor obteve 22,68 GPa, 26,14 GPa, e 27,35 GPa nas idades, 3, 14 e 28 dias, respectivamente, demonstrando uma ligeira estabilidade no intervalo de valores entre a primeira idade e os 28 dias. Contudo, ao comparar esses valores aos resultados apresentados na Fig. 22 percebe-se que os resultados do concreto CR foram superiores. Supõe-se que esta diferença possa ter ocorrido pelo fator água/aglomerante utilizado pelo pesquisador (0,60) e, portanto, com um concreto mais poroso houve maior dificuldade de passagem da frequência ressonante.

Para fins comparativos dos resultados do módulo de elasticidade do concreto CM da forma como foi obtido neste estudo, observou-se pouca literatura utilizando a substituição parcial do cimento por metacaulim e submetendo os concretos ao módulo de elasticidade dinâmico. Contudo, observou-se alguns estudos a respeito da definição do módulo de elasticidade dinâmico por meio da propagação de pulso ultrassônico, o ensaio de ultrassom e, a partir dele, determinar o módulo de elasticidade.

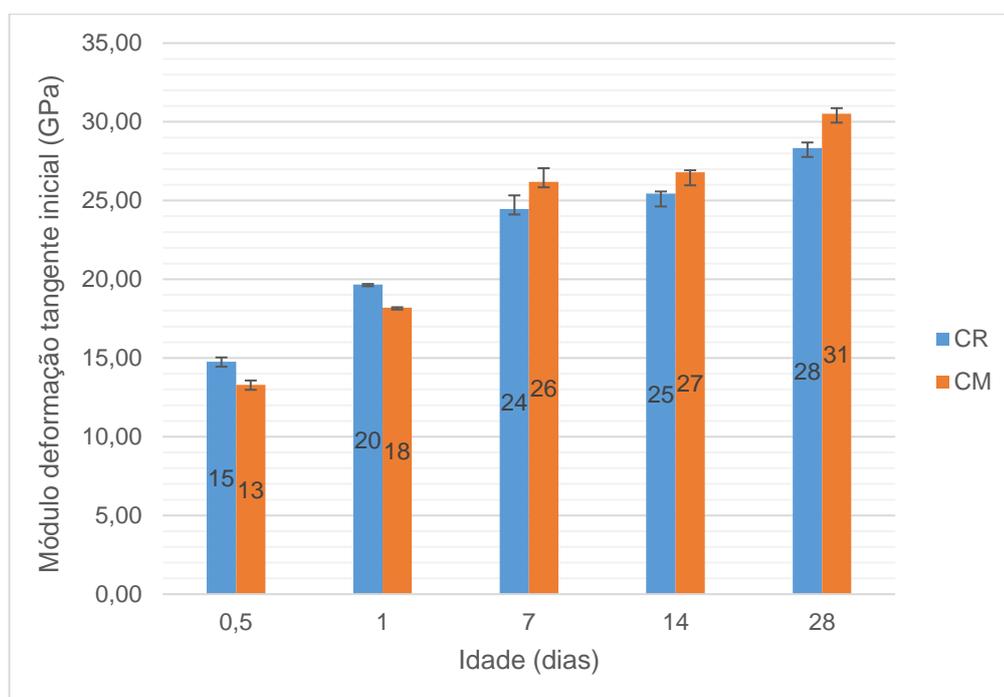
Teodoro et al. (2018) realizaram uma pesquisa com a substituição parcial de 10% de metacaulim por peso do cimento CP II-F-40, com relações água/aglomerante variando entre 0,40 e 0,60, com três diferentes metacaulins de alta reatividade. As amostras foram submetidas ao ensaio de compressão axial, módulo de elasticidade estático por meio de compressão do corpo de prova e ensaio de ultrassom utilizando,

equipamento de mesma marca e modelo deste estudo, para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico. Os resultados dos concretos com metacaulim apresentaram módulo de elasticidade ligeiramente superiores ao concreto sem substituição por metacaulim aos 91 dias de idade.

#### 4.4.2 Módulo de elasticidade estático estimado

O módulo de elasticidade estático, ou módulo de deformação tangente inicial, pode ser determinado experimentalmente seguindo os requisitos da NBR 8.522 (ABNT, 2017). Contudo, objetivando dar ênfase aos ensaios não destrutivos, e para fim de comparação entre esta grandeza e o módulo de elasticidade por frequência ressonante, optou-se por calcular o módulo de elasticidade estático tangente inicial de acordo com a NBR 6.118 (ABNT, 2014), seção 8.2.8 (Eq. 9 neste trabalho), utilizando os resultados do ensaio de resistência à compressão apresentados anteriormente na Fig. 19. Os resultados deste cálculo encontram-se na Figura 23.

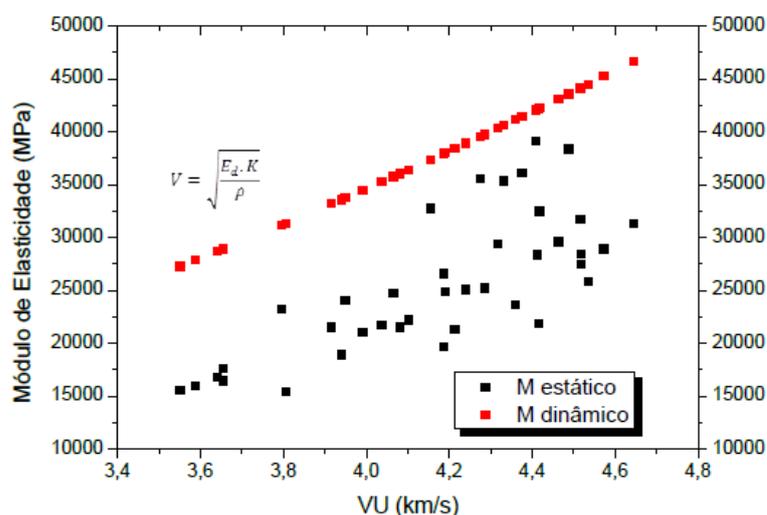
**Figura 23** - Resultados médios e amplitude de variação dos valores calculados do módulo de deformação tangente inicial com base nos resultados de resistência à compressão nas diferentes idades.



Observou-se que o módulo de deformação tangente inicial estimado, assim como nos resultados do ensaio de resistência à compressão, demonstra um avanço do concreto CM em relação ao concreto CR a partir do sétimo dia pós concretagem. Este resultado difere-se do auferido nos ensaios de módulo de elasticidade por frequência ressoante, onde o concreto com metacaulim obteve resultados superiores ao concreto de referência em todas as idades. Em termos absolutos dos valores, percebeu-se também que o resultado do módulo de elasticidade dinâmico (Fig. 22) apresentou-se maior que os resultados obtidos pelo calculado pela equação da NBR 6.118 (ABNT, 2014). Segundo Mehta e Monteiro (2014), o módulo de elasticidade dinâmico é 20 a 40% maior do que o módulo de elasticidade estático, confirmando a tendência apresentada pelos valores observados neste estudo.

Mohamad et al. (2015) realizaram um estudo combinado de diferentes ensaios não destrutivos para averiguar a possibilidade de correlação com a resistência à compressão. Dentre eles, utilizaram o ultrassom para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico e o ensaio de módulo de elasticidade estático preconizado pela NBR 8.522 (ABNT, 2017). Os autores também verificaram que existe uma diferença significativa no valor do módulo de elasticidade dinâmico em relação ao estático, principalmente para concretos com níveis de resistência à compressão menor que 40 MPa. Os pesquisadores também observaram que quanto maior a velocidade de pulso ultrassônico auferida os valores dos dois tipos de módulo de elasticidade se aproximavam (Fig. 24).

**Figura 24** - Módulos de elasticidade estático e dinâmico em relação a velocidade de pulso ultrassônico.

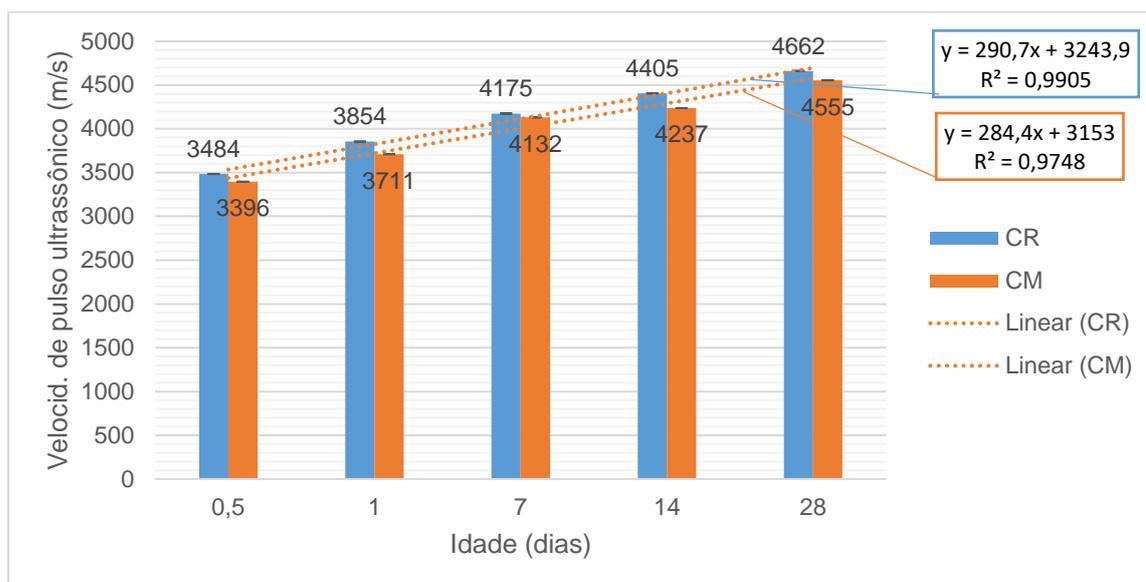


Fonte: Mohamad et al. (2015)

#### 4.5 Determinação da Velocidade de Pulso Ultrassônica

A Figura 25 apresenta os resultados médios e amplitude de variação dos valores de velocidade de propagação de pulso ultrassônico nas diferentes idades pós moldagem do concreto.

**Figura 25** - Resultados médios e amplitude de variação dos valores de velocidade de propagação de pulso ultrassônico nas diferentes idades.



Observa-se também um crescimento monotônico das velocidades nas diferentes idades em ambos os concretos. Nota-se que o concreto de referência obteve valor de velocidade superior ao concreto CM em 2%, 3%, 1%, 3% e 2%, respectivamente, nas idades de 12 e 24 horas, 7, 14 e 28 dias. Importante destacar que são valores muito próximos, o que indicou, assim como no ensaio de resistência a compressão axial, que os dois concretos se comportaram da mesma forma no processo de hidratação. Resultados semelhantes foram obtidos por Evangelista (2002) aos 28 dias e Mohamad (2015) aos 7, 14 e 28 dias para concretos similares ao concreto CR, assim como por Teodoro et al. (2018) com concretos com substituição parcial por metacaulim.

Conforme citado na parte que tratou dos resultados do módulo de elasticidade, traz-se mais uma vez a contribuição dos estudos de Teodoro *et al.* (2018) a respeito dos concretos produzidos 10% de substituição em peso de cimento de três diferentes tipos de metacaulim de alta reatividade e diferentes relações água/aglomerante. Assim como no presente estudo, foi observado, no ensaio de ultrassom, que o

concreto utilizando apenas cimento como aglomerante obteve resultados maiores que os concretos com substituição parcial por metacaulim. Os autores apontaram a dificuldade de chegar a uma conclusão quanto ao efeito do uso dos metacaulins no concreto, no que se refere à velocidade de pulso ultrassônico e afirmaram que a variação na VPU se deveu mais às diferentes relações água/aglomerante. Contudo, afirmaram que a técnica velocidade de pulso ultrassônico possui alta reprodutibilidade, ou seja, baixo coeficiente de variação. Deste modo, por se tratar de uma técnica confiável a sua associação com demais ensaios não destrutivos pode conduzir à melhores estimativas em relação à resistência à compressão dos concretos.

Hong et al. (2020) realizaram testes em concretos projetados para 30 MPa aos 28 dias, e assim como neste estudo, foram feitas leituras em idades precoces. Os corpos de prova foram ensaiados com 16 e 24 horas, 7, 14 e 28 dias, obtendo resultados de 96 m/s às 16 horas até 3.389 m/s aos 28 dias, resultados ligeiramente menores que os obtidos neste estudo.

Segundo Godinho et al. (2018) os resultados do ensaio de ultrassom indicam a homogeneidade do concreto e a velocidade de ultrassom é afetada pela densidade do concreto, obtendo-se, portanto, velocidade de ultrassom mais altas para concretos mais densos. Porém Güçlüer (2020) alerta para o fato de que, embora o concreto apresente maior densidade não tem necessariamente resistência mais elevada, sobretudo por influência de seus agregados.

Muduli e Mukharjee (2019) reportam que a substituição de cimento por metacaulim em concretos com agregados naturais apresentam influências pouco significativas, da ordem de 3,3% a mais que um concreto sem a adição deste material. Esses autores reafirmam o defendido por Godinho et al. (2018), de que a velocidade de pulso ultrassônico é diretamente dependente da densidade, homogeneidade, vazios e fissuras no concreto. O acréscimo de metacaulim no concreto poderia auxiliar tanto no preenchimento das microfissuras pelo efeito fíler quanto dos poros pela pozolanicidade. Contudo, na substituição parcial do cimento em 20% este efeito não é tão relevante como foi observado neste estudo.

A respeito da influência do corpo de prova estar saturado ou não, a norma C 597 (ASTM, 2016) informa que em concretos saturados a velocidade de pulso ultrassônico pode ser maior em 5% se comparado a um concreto não saturado. No caso deste estudo, não foi investigado essa correlação, visto que os concretos

estavam em cura submersa, mas eram retirados da água 24h antes da submissão aos ensaios.

A seguir propõe-se analisar estes resultados de forma a qualificá-lo. Para tanto utiliza-se a norma britânica BS EN 12504 (2004), que precede a elaboração das normas NBR 8802 (ABNT, 2019), a ASTM C 597 (2016), e as conclusões sustentadas por Al-Nu'man et al. (2016) bem como Muduli e Mukharjee (2019) que trazem estes valores embasados pela norma Indiana IS 13311-1 (1992).

**Tabela 6** - Critérios de avaliação do concreto com base na VPU aos 28 dias

<b>Velocidade de pulso ultrassônico (m/s)</b>	<b>Qualidade do concreto</b>
> 4500	excelente
3500 a 4500	bom
3000 a 3500	regular
2000 a 3000	ruim
< 2000	péssimo

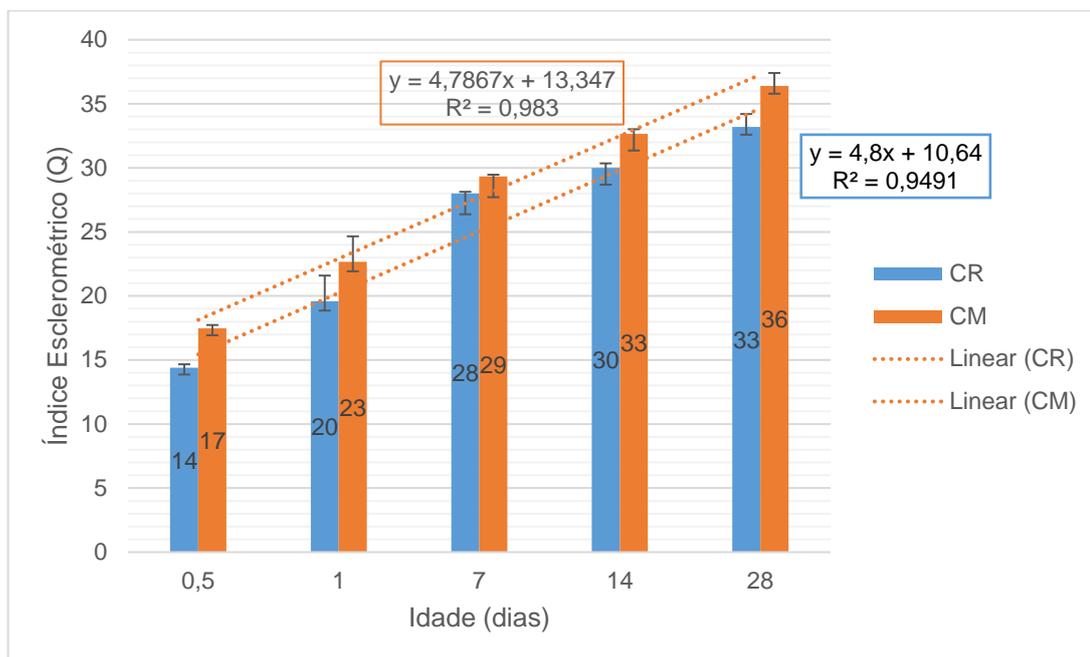
Fonte: compilado da BS EN 12.504 (2004); Al-Nu'man et al. (2016); Muduli e Mukharjee (2019).

De acordo com a Tabela 6, pode-se considerar que os resultados medidos neste estudo (Fig. 25), tanto para o concreto CR quanto CM que, aos 28 dias superaram a marca de 4.500 m/s, indicam a qualidade dos concretos como excelente.

#### **4.6 Esclerometria**

A Figura 26 apresenta os resultados médios bem como a amplitude de variação dos valores medidos no ensaio de esclerometria dos dois concretos estudados, em diferentes idades.

**Figura 26** - Resultados médios e amplitude de variação dos valores do índice esclerométrico Q nas diferentes idades.



Observa-se que ambos os concretos obtiveram crescimento monotônico de seus índices esclerométricos. Diferentemente do ensaio de resistência à compressão, a partir das doze primeiras horas, o concreto com metacaulim obteve maior resultado absoluto. As diferenças entre os dois concretos estiveram na ordem de 21%, 15%, 4%, 8% e 9% nas respectivas idades de 12 e 24 horas, 7, 14 e 28 dias.

Mohamad et al. (2015) explicam que a dureza superficial medida pela esclerometria é influenciada pela existência ou não de porosidade e agregados graúdos próximos a superfície de impacto bem como por outros fatores relacionados à preparação da superfície de ensaio. Neste ponto, o concreto acrescido de metacaulim pôde contribuir para o aumento dos valores de esclerometria se comparados a um concreto sem metacaulim, pois de acordo com Muduli e Mukharjee (2019) valores superiores em concretos com adição de metacaulim devem-se ao refinamento dos vazios e densificação da microestrutura tanto na superfície quanto no interior das misturas de concreto, resultando em uma estrutura mais compacta. Os autores também defendem que a substituição do cimento por 15% de metacaulim resultará em valores maiores que a substituição por 20%.

#### 4.7 Análise qualitativa entre as grandezas medidas nos ensaios não destrutivos para os dois tipos de concreto

A apresentação dos resultados de cada ensaio não destrutivo foi realizada de forma isolada, em seu respectivo tema. A discussão com a literatura também foi feita dessa forma. Propõe-se, a seguir, uma avaliação qualitativa dos resultados em conjunto, com vistas a qualificar o concreto e entender pontos que chamam a atenção entre ensaios. Os diferentes cenários de análise encontram-se a seguir. A comparação com os resultados da compressão será feita mais à frente.

**Quadro 1** - Influência do metacaulim na evolução dos valores absolutos no intervalo de tempo entre ensaios

Concreto	Grandeza medida	Valores		Taxa de evolução	Análise qualitativa
		12 h	28 d		
CR	$\rho_s$ ( $\Omega m$ )	2,25	84	3733%	O concreto CM é mais resistivo que o concreto CR. Isso apenas não pôde ser verificado nas primeiras idades devido à alta presença de água livre na matriz do concreto.
CM		2,25	366	16267%	
CR	$\rho_v$ ( $\Omega m$ )	9	37	411%	
CM		9	150	1667%	
CR	$E_d$ (GPa)	32	51	159%	O concreto CM apresentou maior valor de módulo de elasticidade, porém com evolução muito próxima do concreto CR. Sem alterações significativas devido ao metacaulim.
CM		36	53	147%	
CR	V (m/s)	3484	4662	134%	Ambos os concretos apresentaram evolução semelhante, mesmo o concreto CR tendo valores individuais maiores que o CM no decorrer do tempo. Sem alterações significativas devido ao metacaulim.
CM		3396	4555	134%	
CR	Q	14	33	236%	Ambos os concretos apresentaram evolução semelhante, mesmo o concreto CM tendo valores individuais maiores que o CR no decorrer do tempo. Sem alterações significativas devido ao metacaulim.
CM		17	36	212%	

**Conclusão:** a substituição parcial do cimento por metacaulim em 20% só apresentou diferença significativa nas medidas de resistividade elétrica. Nos demais ensaios os dois concretos se comportaram de forma semelhante no desenvolvimento de suas propriedades.

**Quadro 2** - Confiabilidade das medições em relação à correlação dos valores nas idades medidas

Concreto	Grandeza medida	Coef. Correlação (R <sup>2</sup> ) - 12 h a 28 d	Classificação *	Análise qualitativa
CR	$\rho_s$ ( $\Omega\text{m}$ )	0,93	muito forte	Ambos os concretos apresentaram correlação muito forte no desenvolvimento da resistividade, com pequena amplitude de variação dos resultados evidenciando desenvolvimento monotônico da propriedade. O concreto CM apresentou correlação maior na evolução desta propriedade. A amplitude de variação dos resultados foi maior se comparado aos demais ensaios.
CM		0,98	muito forte	
CR	$\rho_v$ ( $\Omega\text{m}$ )	0,95	muito forte	
CM		0,98	muito forte	
CR	$E_d$ (GPa)	0,83	forte	
CM		0,90	muito forte	
CR	V (m/s)	0,99	muito forte	
CM		0,97	muito forte	
CR	Q	0,94	muito forte	
CM		0,98	muito forte	

**Conclusão:** em todos os ensaios o desenvolvimento das propriedades medidas ao longo do tempo deu-se de forma semilinear. Contudo, os resultados do módulo de elasticidade apresentaram menor índice de correlação, o que pode indicar que o desenvolvimento do módulo em ambos os concretos não é dado de forma tão linear quanto nos demais ensaios.

\*Segundo critérios de Wiedermann e Hagmann (2015)

**Quadro 3** - Avaliação dos concretos quanto ao resultado indicativo da propriedade medida frente à literatura aos 28 dias

Concreto	Grandeza medida	Valor 28 d	Propriedade	Resultado indicativo	Análise qualitativa
CR	$\rho_s$ ( $\Omega m$ )	84	risco de corrosão (Tab. 2)	médio risco	Substituir parte do concreto por metacaulim tornou-o menos susceptível a penetração de agentes externos que provocam corrosão.  Possivelmente, os dois concretos se comportarão da mesma forma sob ação de cargas e encontram-se dentro da faixa de valores encontrados na literatura para os concretos com condições semelhantes.  Nos dois concretos a VPU foi alta, contudo, diferente da resistividade elétrica, o concreto CM não apresentou relevante alteração, levando ao questionamento quanto à sua ação na melhoria da porosidade da matriz cimentícia.
CM		366		baixo risco	
CR	$\rho_v$ ( $\Omega m$ )	37	risco de corrosão (Tab. 1)	alto risco	
CM		150		baixo risco	
CR	$E_d$ (GPa)	51	rigidez, ou capacidade de absorção de cargas sem danos maiores	atende ou não atende	
CM		53			
CR	V (m/s)	4662	qualidade da matriz cimentícia / menor porosidade (Tab. 6)	excelente	
CM		4555		excelente	
CR	Q	33	dureza superficial	A resistência à compressão projetada foi obtida utilizando o ábaco da Fig. 7	Ambos os concretos obtiveram bons resultados de dureza superficial, contudo sem grande distanciamento por influência do metacaulim.
CM		36			

**Conclusão:** os dois concretos apresentaram-se bons concretos para uso em edificações no que tange a durabilidade das estruturas. Contudo os resultados não são conclusivos a respeito do refinamento da matriz de poros dos concretos, pois a diferença evidenciada pelo concreto CM no ensaio de resistividade não aparece no ensaio de ultrassom. A avaliação do módulo de elasticidade e o índice esclerométrico é feita em função das características portantes de um projeto estrutural, mas não há evidências claras de que se correlacionam, mas possivelmente, que possam se complementar.

Como pode ser visto nos três cenários apresentados, os ensaios não destrutivos evidenciaram, de forma global, que os concretos atendem aos parâmetros dentro dos resultados indicativos que sem propõem.

#### 4.8 Correlação entre as grandezas obtidas nos ensaios não destrutivos e a resistência à compressão nas primeiras idades

Em continuidade à investigação principal deste trabalho de pesquisa, que constitui no estudo do desenvolvimento de resistência à compressão dos concretos nas primeiras idades por meio de ensaios não destrutivos, apresenta-se, nesta etapa, correlações matemáticas entre os dados dos ensaios não destrutivos realizados aos resultados de resistência à compressão axial de forma a verificar se há uma correlação confiável entre eles. Para tanto foram desenvolvidas curvas lineares, exponenciais, logarítmicas e de potência. A avaliação desta correlação deu-se conforme os critérios de correlação de Pearson, listados por Wiedermann e Hagmann (2015) (Tab. 7), onde:

**Tabela 7** - Abordagem convencional para interpretação do coeficiente de correlação.

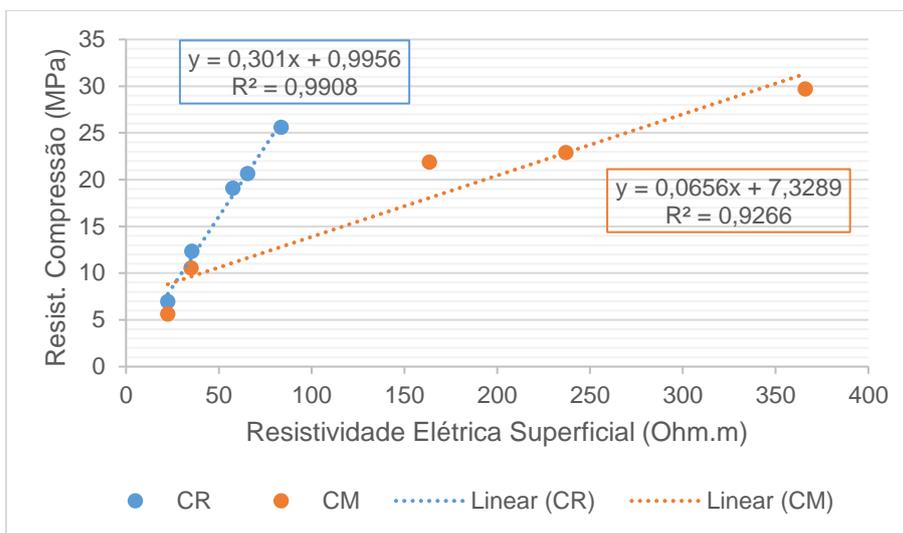
<b>Coeficiente (<math>R^2</math>)</b>	<b>Correlação</b>
0,00 a 0,10	insignificante
0,10 a 0,39	fraca
0,40 a 0,69	moderada
0,70 a 0,89	forte
0,90 a 1,00	muito forte

Fonte: adaptado de Wiedermann e Hagmann (2015).

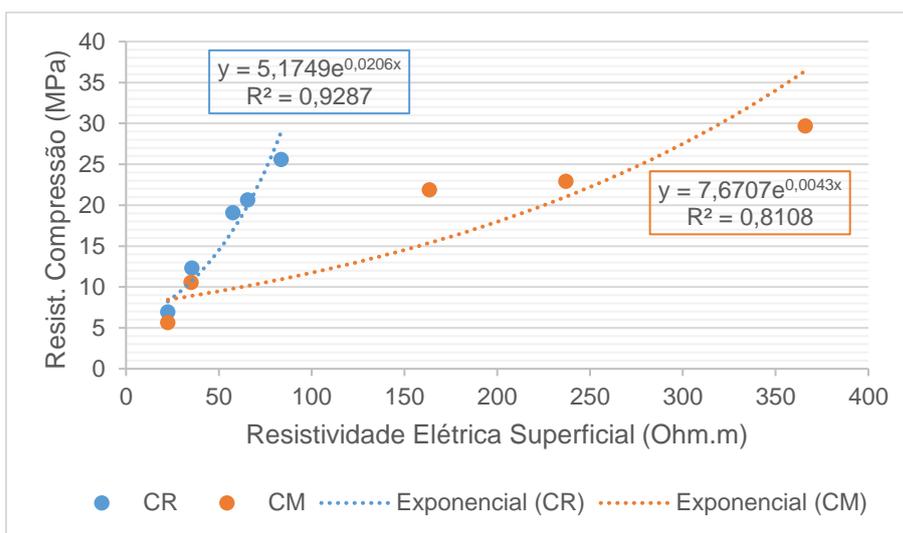
##### 4.8.1 Resistividades elétricas e a resistência à compressão

As Figuras 27a-d apresentam respectivamente, a simulação de correlação linear, exponencial, logarítmica e de potência entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica superficial dos dois tipos de concreto testados.

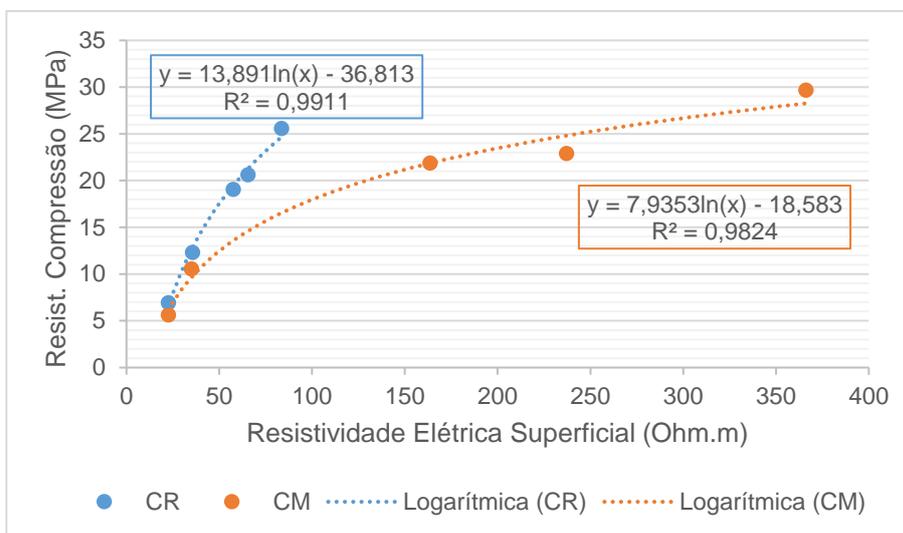
**Figura 27** - Correlação entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades.



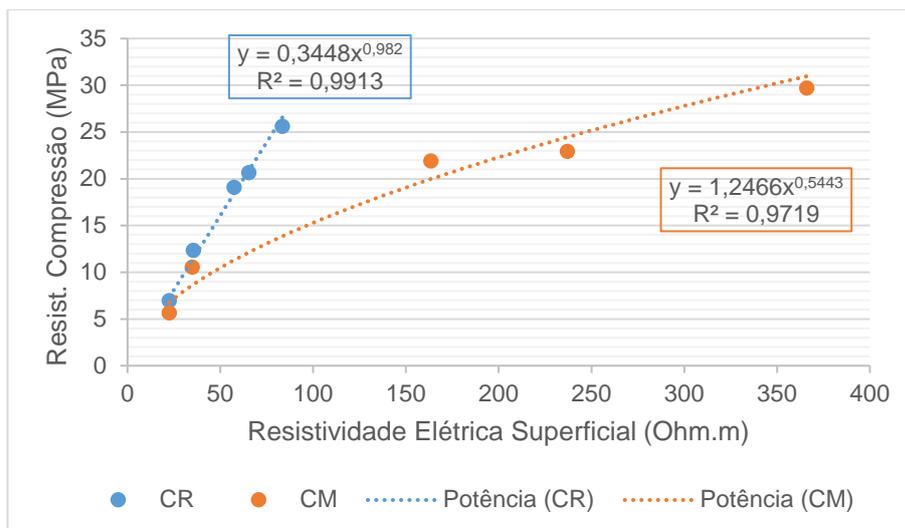
a)



b)



c)



A Tabela 8 relaciona os valores de  $R^2$  de cada curva, bem como destaca a equação de melhor correlação para os concretos ensaiados ao que se refere a resistividade elétrica superficial.

**Tabela 8** - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica superficial com indicação de equação de melhor ajuste.

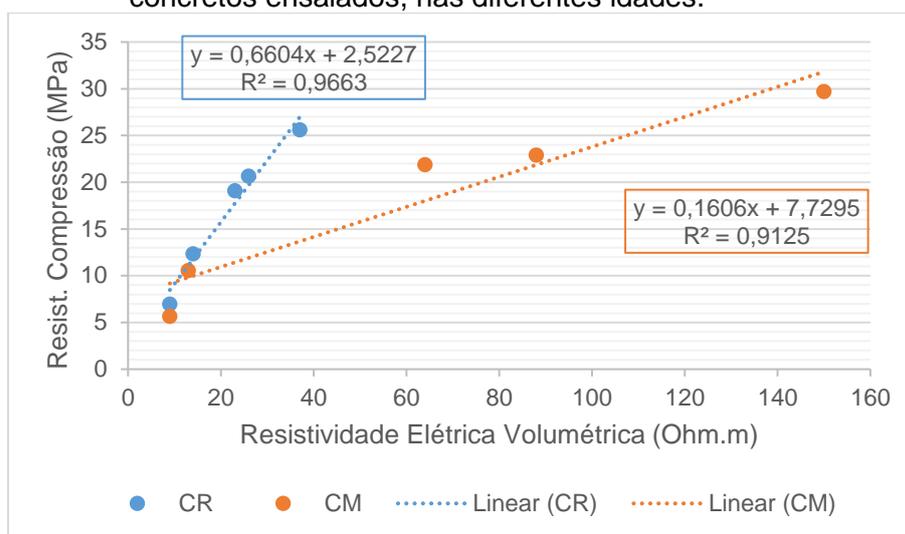
Correlação	Curva	Coefficiente $R^2$	Classificação	Equação de melhor ajuste
$f_c \times \rho_s$ (CR)	Linear	0,9908	muito forte	$f_c = 13,891 \ln(\rho) - 36,813$
	Exponencial	0,9277	muito forte	
	Logarítmica	0,9911	muito forte	
	Potência	0,9899	muito forte	
$f_c \times \rho_s$ (CM)	Linear	0,9266	muito forte	$f_c = 7,9353 \ln(\rho) - 18,583$
	Exponencial	0,8045	forte	
	Logarítmica	0,9824	muito forte	
	Potência	0,9524	muito forte	

De acordo com os critérios apresentados por Wiedermann e Hagmann (2015), observa-se que o ajuste por uma equação logarítmica foi o que apresentou correlação mais forte nos dois tipos de concreto enquanto que o ajuste exponencial apresentou menor correlação, porém dentro da faixa de correlação avaliada como forte.

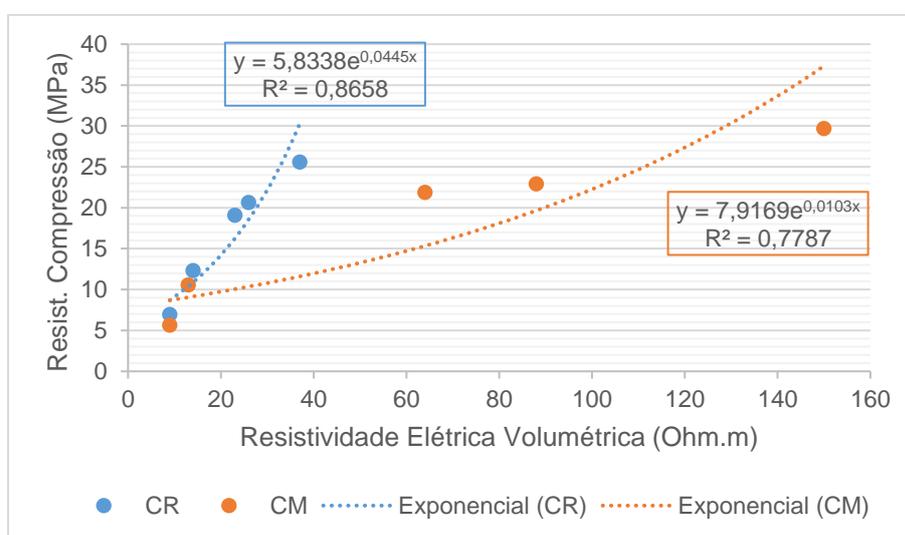
O concreto de referência obteve valores de correlações superiores aos do concreto com metacaulim, com menor variabilidade entre as curvas elaboradas, indicando que concretos com adições possuem maior variabilidade.

As Figuras 28a-d apresentam respectivamente, a simulação de correlação linear, exponencial, logarítmica e de potência entre a resistência à compressão e a resistividade elétrica volumétrica dos dois tipos de concreto testados.

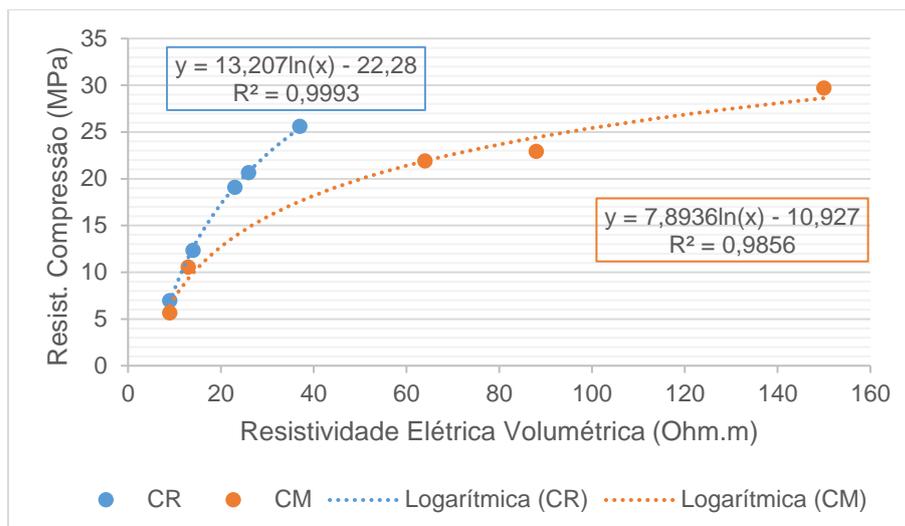
**Figura 28** - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e a resistividade elétrica volumétrica pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades.



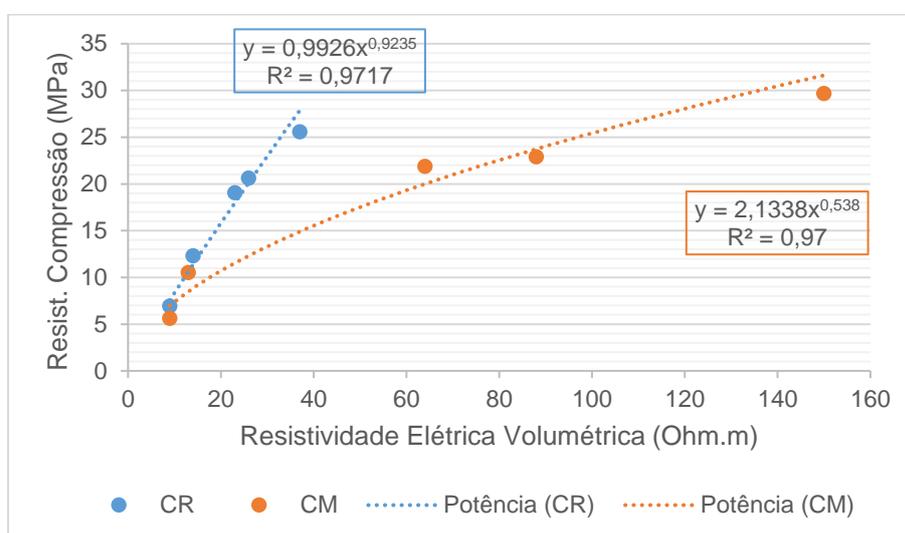
a)



b)



c)



d)

A Tabela 9 relaciona os valores de  $R^2$  de cada curva, bem como a equação de melhor correlação para os concretos ensaiados ao que se refere a resistividade elétrica volumétrica.

**Tabela 9** - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e a resistividade elétrica volumétrica com indicação de equação de melhor ajuste

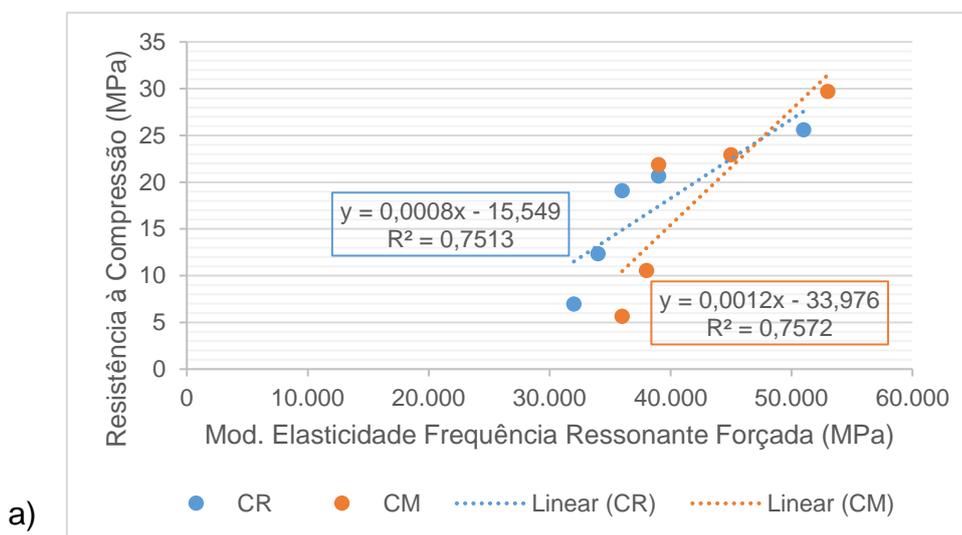
Correlação	Curva	Coefficiente $R^2$	Classificação	Equação de melhor ajuste
$f_c \times \rho_v$ (CR)	Linear	0,9963	muito forte	$f_c = 13,207\ln(\rho) - 22,28$
	Exponencial	0,8769	forte	
	Logarítmica	0,9993	muito forte	
	Potência	0,9766	muito forte	
$f_c \times \rho_v$ (CM)	Linear	0,9125	muito forte	$f_c = 7,8936\ln(\rho) - 10,927$
	Exponencial	0,7792	forte	
	Logarítmica	0,9856	muito forte	
	Potência	0,9436	muito forte	

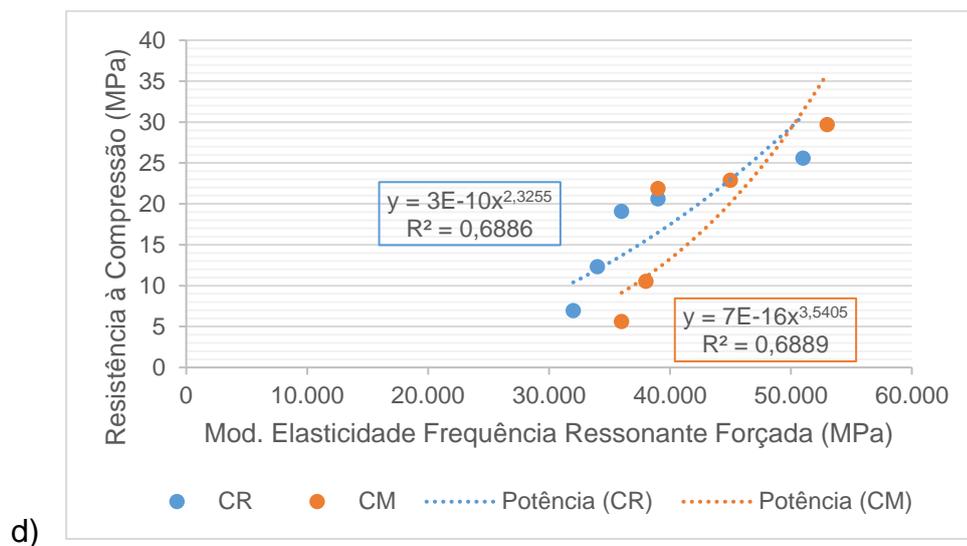
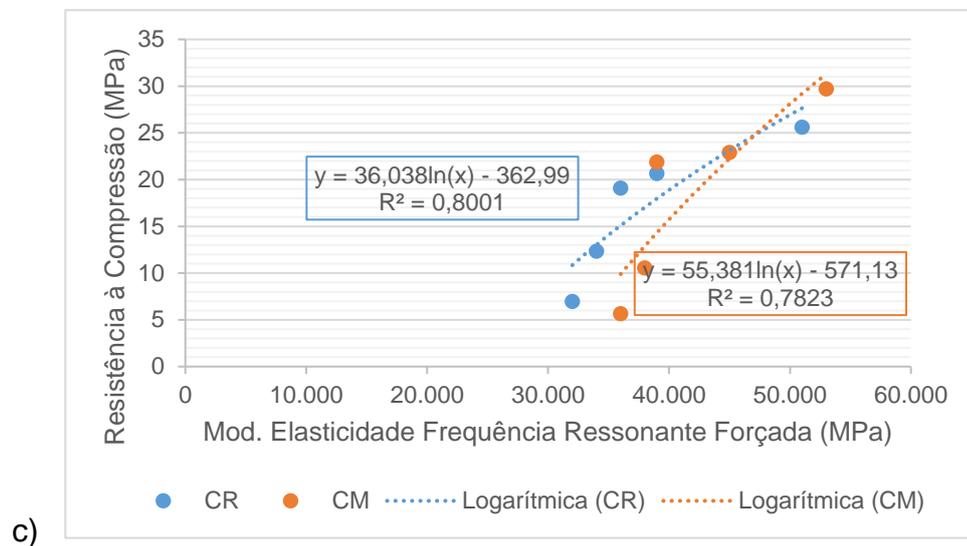
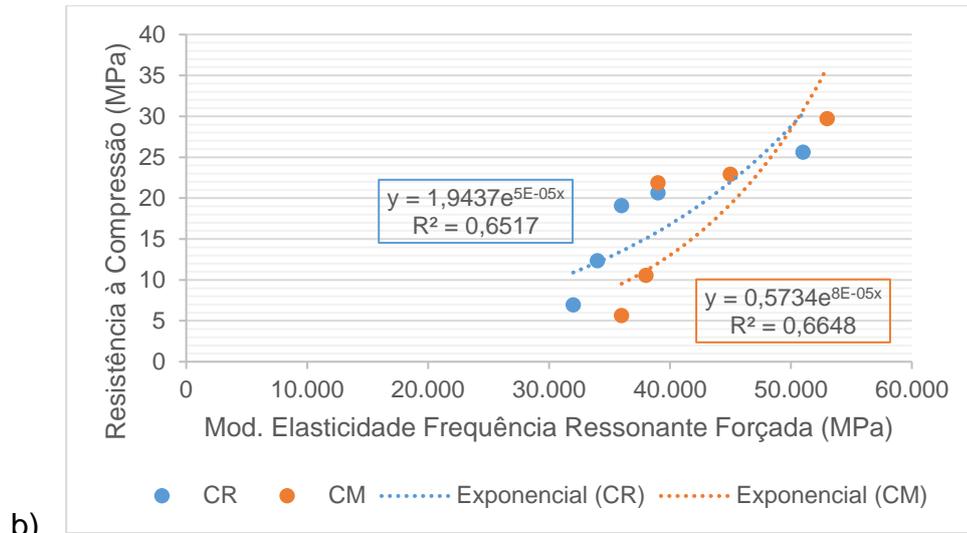
Semelhante ao verificado com os resultados da resistividade superficial, tanto para o concreto de referência quanto para o concreto com metacaulim, as curvas logarítmicas apresentaram melhor coeficiente de correlação, de classificação muito forte. Da mesma forma, o concreto CR apresentou maior valor de coeficientes nas quatro curvas testadas.

#### 4.8.2 Módulo de elasticidade frequência ressonante forçada e a resistência à compressão

As Figuras 29a-d apresentam respectivamente, a simulação de correlação linear, exponencial, logarítmica e de potência entre a resistência à compressão e Módulo de elasticidade frequência ressonante forçada dos dois tipos de concreto testados.

**Figura 29** - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e o módulo de elasticidade frequência ressonante forçada pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades.





A Tabela 10 relaciona os valores de  $R^2$  de cada curva, bem como a equação de melhor correlação para os concretos ensaiados ao que se refere ao módulo de elasticidade frequência ressonante.

**Tabela 10** - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade frequência ressonante com indicação de equação de melhor ajuste

Correlação	Curva	Coefficiente $R^2$	Classificação	Equação de melhor ajuste
$f_c \times E$ (CR)	Linear	0,7513	forte	$f_c = 36,038 \ln(E) - 362,99$
	Exponencial	0,6098	moderada	
	Logarítmica	0,8011	forte	
	Potência	0,6657	moderada	
$f_c \times E$ (CM)	Linear	0,7572	forte	$f_c = 55,381 \ln(E) - 571,13$
	Exponencial	0,6239	moderada	
	Logarítmica	0,7823	forte	
	Potência	0,6589	moderada	

Ao analisar as curvas, bem como seus coeficientes de correlação, nota-se um decréscimo dos valores do coeficiente  $R^2$  se comparados aos resultados de resistividade elétrica. Em ambos os concretos ensaiados a curva logarítmica foi a que obteve maior resultado deste coeficiente, contudo, se enquadrando apenas na classificação de correlação forte, com valor máximo de  $R^2 = 0,80$  para o concreto de referência. A correlação para o concreto CM foi ainda menor, com  $R^2 = 0,78$ .

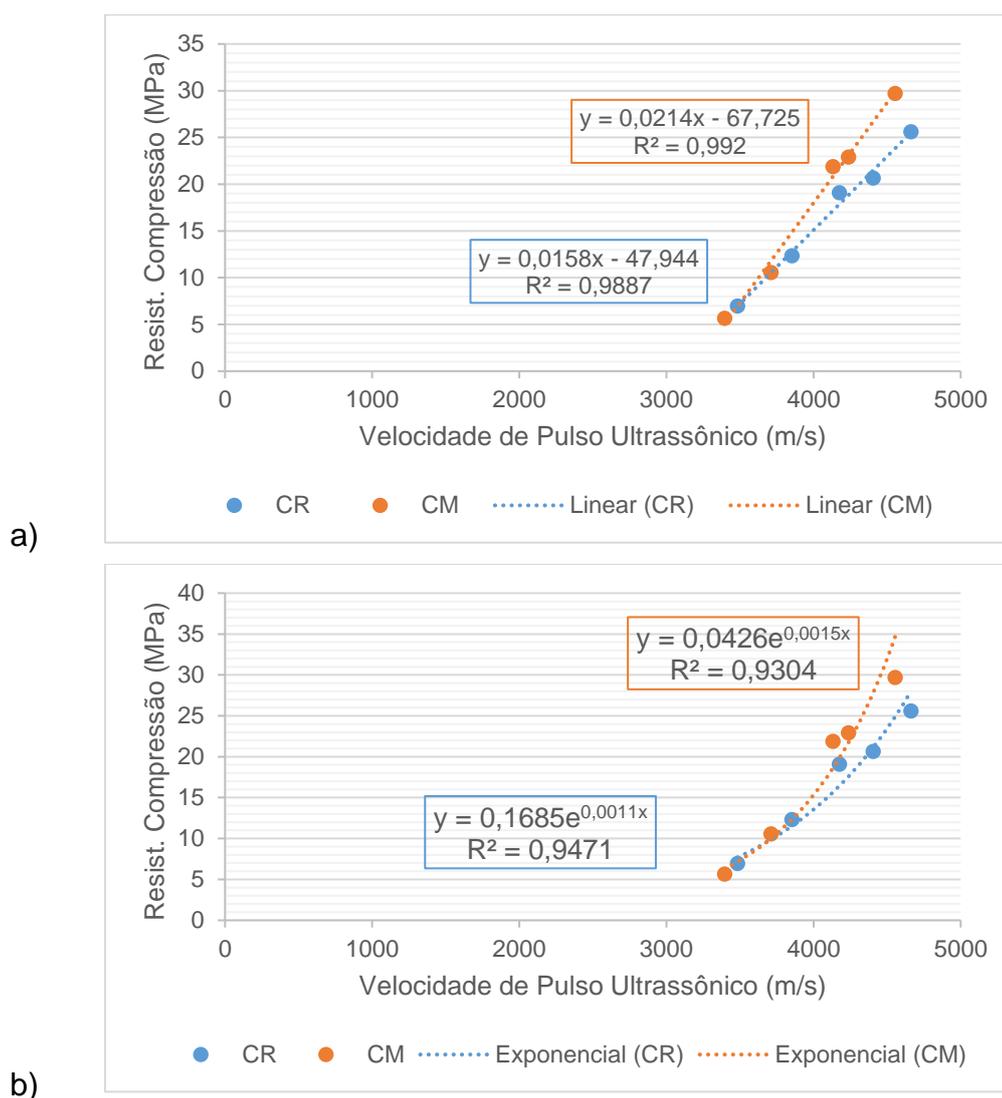
Foram observadas, nas outras curvas, correlações indicadas como moderadas, o que leva a necessidade de avaliar melhor se o módulo de elasticidade tem uma tendência de desenvolvimento semelhante ao ganho de resistência à compressão. Chamon (2006) chama a atenção para o fato de que, em seus estudos, o módulo de elasticidade dinâmico não acompanha de forma monotônica a variação da resistência à compressão. A autora evidencia a dificuldade de verificar uma dependência direta entre estes parâmetros e indica que os valores apresentados em seu estudo indicam que os mecanismos que controlam essas propriedades não são inteiramente dependentes.

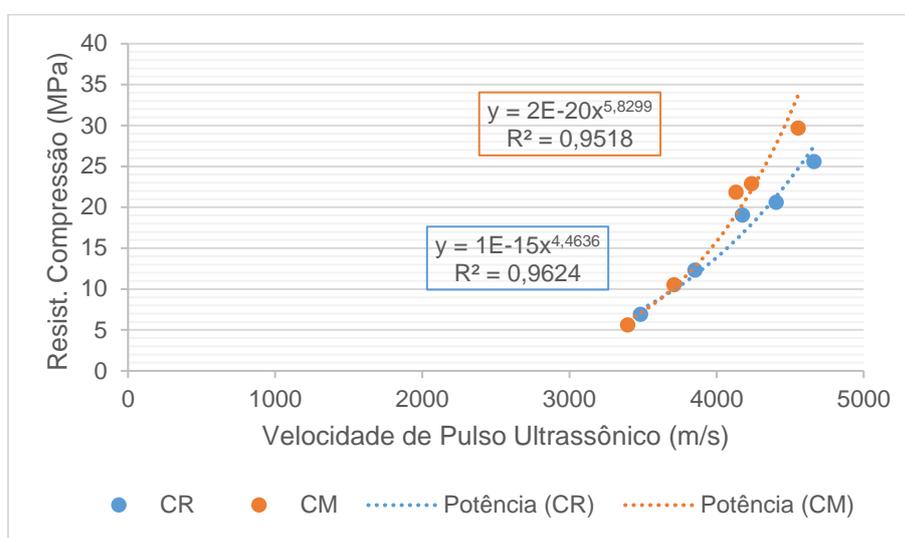
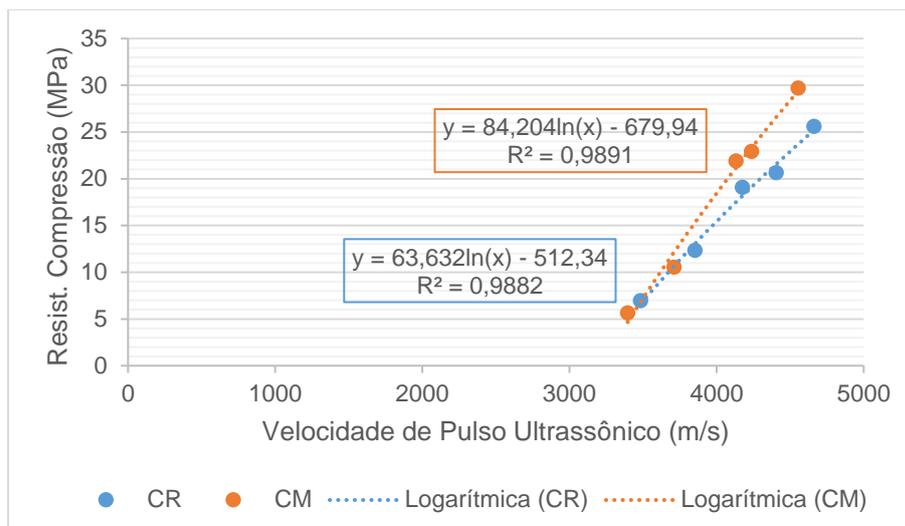
Não foi estabelecida uma curva de correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade estático tangente, pois este foi obtido a partir dos resultados da resistência à compressão utilizando a Equação 9.

#### 4.8.3 Velocidade de pulso ultrassônico e a resistência à compressão

As Figuras 31a-d apresentam respectivamente, a simulação de correlação linear, exponencial, logarítmica e de potência entre a resistência à compressão e a velocidade de pulso ultrassônico dos dois tipos de concreto testados.

**Figura 30** - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e a velocidade de pulso ultrassônico pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades.





A Tabela 11 relaciona os valores de  $R^2$  de cada curva, bem como a equação de melhor correlação para os concretos ensaiados ao que se refere à velocidade de pulso ultrassônico.

**Tabela 11** - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade frequência ressonante com indicação de equação de melhor ajuste

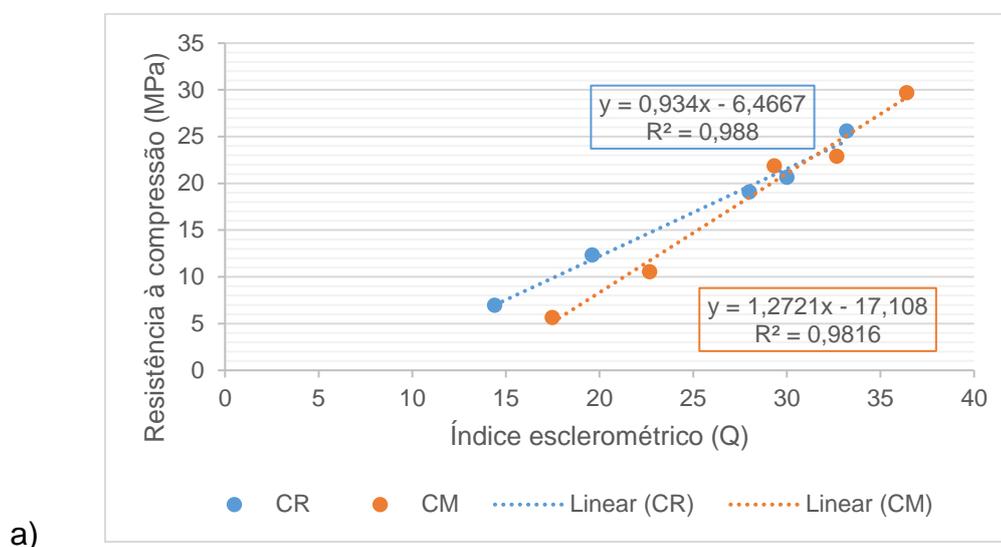
Correlação	Curva	Coefficiente $R^2$	Classificação	Equação de melhor ajuste
$f_c \times v$ (CR)	Linear	0,9887	muito forte	$f_c = 0,0158v - 47,944$
	Exponencial	0,9572	muito forte	
	Logarítmica	0,9882	muito forte	
	Potência	0,9717	muito forte	
$f_c \times v$ (CM)	Linear	0,9920	muito forte	$f_c = 0,0214v - 67,725$
	Exponencial	0,9635	muito forte	
	Logarítmica	0,9891	muito forte	
	Potência	0,9771	muito forte	

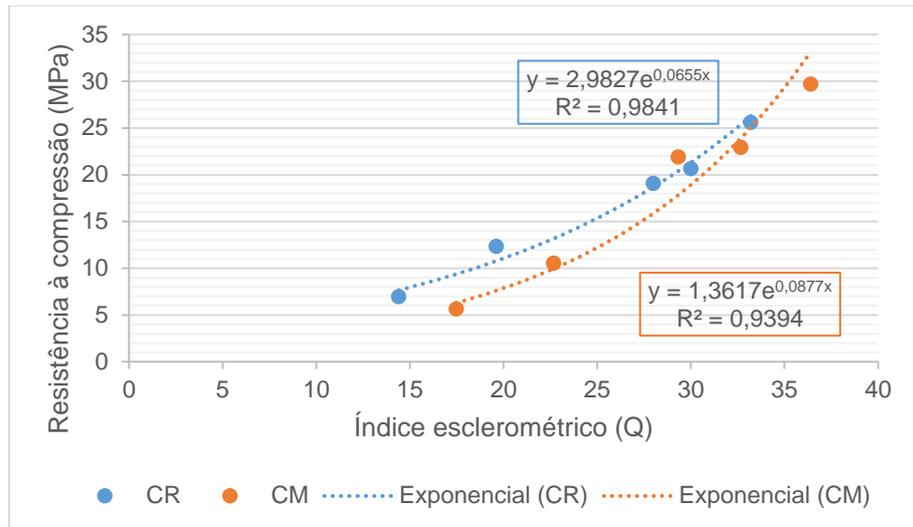
As curvas simuladas para ambos os concretos apresentaram todos os coeficientes com resultados próximos de 1, correlação muito forte. Seguindo a tendência dos ensaios de esclerometria a curva de melhor ajuste foi a linear. Muduli e Mukharjee (2019) apresentaram uma correlação linear na ordem de 0,95 aos 28 dias em todas as substituições de concreto testadas pelos autores enquanto que Al-Nu'man et al. (2016) encontraram melhor ajuste em curvas exponenciais, com coeficiente  $R^2$  na ordem de 0,88.

#### 4.8.4 Esclerometria e a resistência à compressão

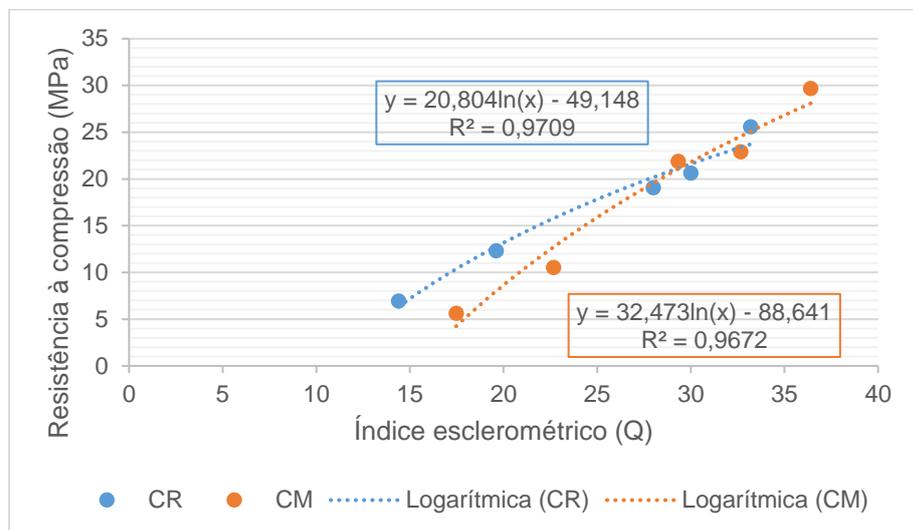
As Figuras 30a-d apresentam respectivamente, a simulação de correlação linear, exponencial, logarítmica e de potência entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico dos dois tipos de concreto testados.

**Figura 31** - Correlação entre a resistência à compressão axial obtida e o índice esclerométrico pela curva: a) linear b) exponencial c) logarítmica d) potência, dos dois concretos ensaiados, nas diferentes idades.

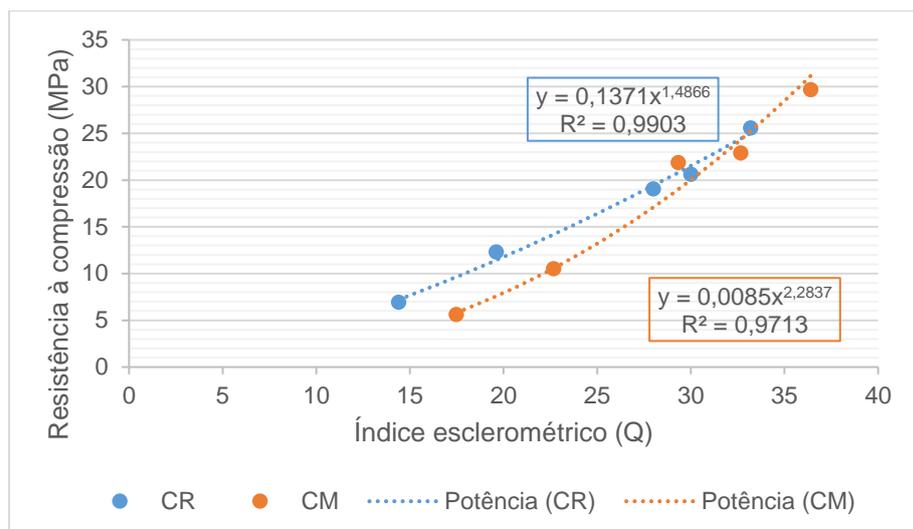




b)



c)



d)

A Tabela 12 relaciona os valores de  $R^2$  de cada curva, bem como a equação de melhor correlação para os concretos ensaiados ao que se refere ao índice esclerométrico.

**Tabela 12** - Resultados das correlações testadas entre a resistência à compressão axial e o índice esclerométrico com indicação de equação de melhor ajuste

Correlação	Curva	Coefficiente $R^2$	Classificação	Equação de melhor ajuste
$f_c \times Q$ (CR)	Linear	0,9980	muito forte	$f_c = 0,934Q - 6,4667$
	Exponencial	0,9722	muito forte	
	Logarítmica	0,9709	muito forte	
	Potência	0,9908	muito forte	
$f_c \times Q$ (CM)	Linear	0,9816	muito forte	$f_c = 0,0085Q^2,2837$
	Exponencial	0,9617	muito forte	
	Logarítmica	0,9672	muito forte	
	Potência	0,9858	muito forte	

Dos ensaios não destrutivos anteriormente avaliados (resistividades e módulo de elasticidade) o ensaio de esclerometria foi o único que obteve correlações muito fortes em todos os tipos de curva simulados, resultados acima de 0,95, o que indica correlação direta entre o desenvolvimento do índice esclerométrico e o avanço do desenvolvimento da resistência à compressão, como também observado por Muduli e Mukharjee (2019), que obtiveram um fator de correlação de 0,92 em seus estudos.

Enquanto nos outros ensaios, tanto para o concreto CR e CM, teve-se o mesmo tipo de curva, para o índice esclerométrico uma curva linear obteve maior correlação entre para o concreto de referência enquanto que para o concreto com substituição parcial por metacaulim obteve maior resultado em uma curva de potência. Inversamente o concreto CR teve seu segundo maior resultado com uma curva de potência e o CM teve seu melhor resultado com uma curva linear. A diferença se deu apenas pela terceira casa decimal dos coeficientes  $R^2$ .

A ASTM C 805 (2018) orienta que a curva de correlação dos resultados apurados ensaio de esclerometria *in situ* pode ser feita segundo as diretrizes da ACI 228 1R (2019). Uma outra metodologia para a correlação entre o índice Q e a resistência à compressão é proposta por Carino (2003), que traz um método simplificado de definição da resistência onde tem-se a seguinte Equação:

$$F_{ck} \text{ (Mpa)} = aQ^3 + bQ^2 + cQ + d \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

Q é o índice esclerométrico obtido da leitura pelo martelo Schmidt

a é uma constante igual a 0

b é uma constante igual a 0,0108

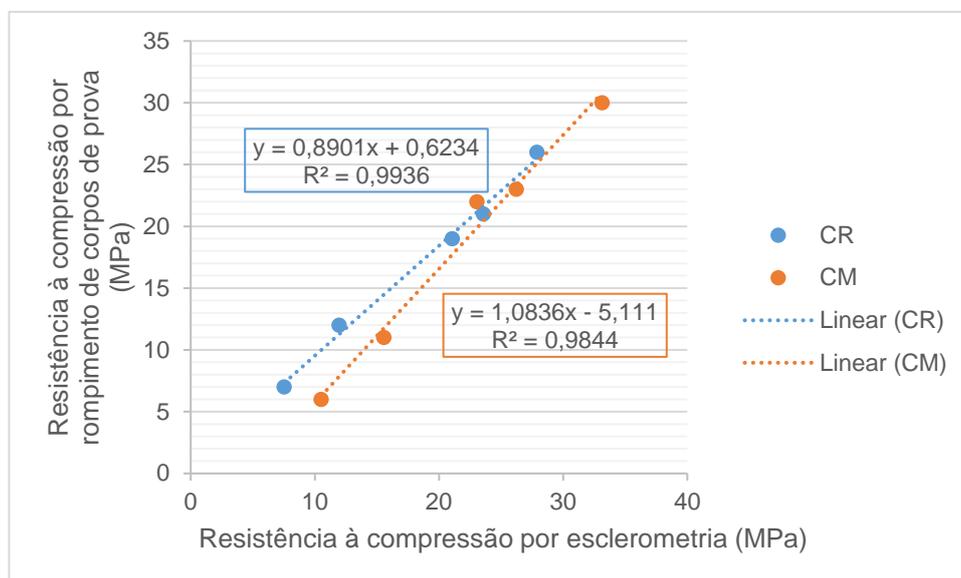
c é uma constante igual a 0,2236

d é uma constante igual a 0

Esta mesma equação encontra-se no manual do equipamento utilizado nesta pesquisa (PROCEQ, 2019). Importante destacar que tanto a ASTM C 805 (2018) quanto Carino (2003) recomendam um ajuste da curva para 10% a menos.

A Figura 32 apresenta o gráfico correlacional de resistência à compressão dos corpos de prova obtidos pela equação 8 e com o ajuste de 10% e a sua comparação com os dados de resistência à compressão axial realizadas pelo rompimento dos corpos de prova.

**Figura 32** – Correlação entre as resistências à compressão obtidas no ensaio de rompimento de corpos de prova versus resistência à compressão calculada pela Eq. 8 com base no índice esclerométrico nas diferentes idades.



Após a correção dos resultados da esclerometria em 10% observou-se que os resultados ficaram muito próximos. Para o concreto CR observou-se uma diferença de apenas de 0,5% entre o valor absoluto de resistência nos dois ensaios o que reitera a importância desta correção preconizada em norma. Este resultado retrata a

confiabilidade do resultado indicativo de resistência à compressão por meio da esclerometria em concretos sem adições minerais significativas como é o caso do concreto de referência em estudo, afirmação também defendida Muduli e Mukharjee (2019). Acredita-se que o concreto CM também obteve um valor muito forte de correlação, pois ele se comportou de forma semelhante ao concreto CR no desenvolvimento da resistência.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo enumeram-se as considerações sobre o desenvolvimento e os resultados obtidos, tomando como ponto de partida as questões apresentadas na parte introdutória, e que nortearam este estudo. Ao final serão acrescentadas conclusões obtidas durante o desenvolvimento da análise dos resultados e que, inicialmente, não foram previstas:

- Os resultados dos diferentes ensaios evoluíram monotonicamente, demonstrando desenvolvimento das propriedades medidas, porém as curvas que representaram esta evolução tiveram características particulares para cada tipo de ensaio e para cada tipo de concreto.
- Embora os concretos estudados tenham apresentado resultados distintos em números absolutos, esses não tiveram grandes intervalos de valores se comparados entre si nas diferentes idades, o que levou a observar que a substituição parcial do concreto por metacaulim em 20% não influenciou em uma performance diferenciada do concreto, ou seja, ambos os concretos se comportaram de forma semelhante. Não foram evidenciadas influências significativas de comportamento pozolânico no concreto CM.
- Determinar a resistência à compressão por meio de ensaios não destrutivos continua sendo um desafio que precisa ser continuamente estudado com vistas ao aprimoramento das técnicas. Embora os concretos tenham apresentado comportamento evolutivo semelhante, ao plotar um gráfico ou definir uma equação de ajuste percebeu-se que para cada tipo de concreto, em cada tipo de ensaio, o desenho desta curva ou a equação foi diferente. Além disso, na literatura muitas outras curvas foram apresentadas, não levando a definição de um método de cálculo único.
- O estudo proposto demonstrou que há a possibilidade correlacionar fortemente a resistência à compressão com os resultados de ensaios de esclerometria, resistividade elétrica e ultrassom, porém para que haja a confiabilidade de uso das equações deverá ser plotada uma curva e equação para cada tipo de concreto que for fabricado. Além disso, para a definição dessa curva o ensaio de resistência à compressão axial continua sendo imprescindível.

Importante destacar que o ensaio de módulo de elasticidade frequência ressonante demonstrou correlação quase moderada, indicando que o módulo de elasticidade não se desenvolve de forma semelhante à resistência à compressão, portanto não é um ensaio que pode ser utilizado com segurança para estimativa desta resistência mecânica.

A seguir elencam-se outras conclusões obtidas:

- A substituição parcial de metacaulim por cimento influencia diretamente na trabalhabilidade da mistura, apresentando um abatimento de tronco de cone menor se comparado a um concreto sem adição deste material. Em situações em que o abatimento é premissa definida, deverá ser avaliado o uso de uma maior porcentagem de aditivo plastificante.
- Os ensaios não destrutivos estudados neste trabalho poderão ser aplicados em idades precoces e, em concretos fabricados com CPV, a partir das 12 horas de fabricação é possível submetê-los aos ensaios sem maiores problemas. Contudo os resultados de ultrassom e de resistividade elétrica não apresentaram resultados que evidenciem as particularidades quando há uma adição mineral sendo utilizada como aglomerante, devido à presença de grande água livre no concreto. Os resultados deste trabalho levam a sugestão de submissão destes ensaios após 7 dias.

Por fim conclui-se que a utilização de métodos não destrutivos para a avaliação dos concretos em idades precoces deve ser incentivada. Verificou-se que há grande contribuição dos resultados destes ensaios para a indicação da evolução da resistência à compressão possibilitando maior controle de qualidade de concretos.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

De forma a contribuir com o avanço da área de estudos abordada nesse trabalho e na literatura estudada sugere-se, a seguir, para trabalhos futuros:

- Avaliar a influência de outros materiais suplementares, nas idades precoces, tanto como substituições parciais do cimento quanto como adições ao concreto,

utilizando a mesma metodologia deste trabalho de pesquisa, ampliando a comparação entre os resultados.

- Avaliar em condições ambientais diferentes dos laboratórios (nos canteiros de obras) se as curvas individuais de cada método não destrutivo bem como as correlações com a resistência à compressão têm comportamento evolutivo semelhante para verificar se os resultados obtidos em laboratório podem ser utilizados nos canteiros de obras.

- Aprofundar o estudo matemático das correlações entre os diferentes ensaios e a resistência à compressão, bem como de métodos combinados, para um mesmo tipo de concreto com vistas a determinar uma única equação que possa ser usada para diversos tipos de concreto bem como para que dois ou mais ensaios possam participar da mesma equação de correlação.

## 6 REFERÊNCIAS

- ABDELOUAHEB, G.; ABDELHALIM, B. Investigation of Concrete Segregation by Ultrasonic Pulse Velocity. **Journal of Architectural Engineering Technology**, v. 5, n. 3, p. 1–6, 2016.
- ABRAMS, D. A. Design of concrete mixtures. **Structural Materials Research Laboratory**, v. 1, Lewis Institute, 1919.
- ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998.
- ALBELLÁN-GARCÍA, J.; SANTOFÍMIO-VARGAS, M. A.; TORRES-CASTELLANOS, N. Analysis of Metakaolin as Partial Substitution of Ordinary Portland Cement in Reactive Powder Concrete. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 9, p. 368-386, 2020.
- AL-NU'MAN, B. S.; AZIZ, B. R.; ABDULLA, S. A.; KHALEEL, S. E. Compressive strength formula for concrete using ultrasonic pulse velocity. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, v. 26, n. 1, p. 8-13, 2015.
- ALVARENGA, C. B. C. S. **Síntese e caracterização de geopolímeros à base de metacaulim e micropartículas de vidro soda-cal**. 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- ARIZZI, A.; CULTRONE, G. Comparing the Pozzolanic Activity of Aerial Lime Mortars Made with Metakaolin and Fluid Catalytic Cracking Catalyst Residue: A Petrographic and Physical-Mechanical Study. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 382-390, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C125-19a**: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. West Conshohocken, PA. ASTM International, 2019. 9p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 215**. Method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. ASTM, 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 597**. Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: concreto - Determinação da consistência pelo abatimento de tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215**: cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222**: concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7584**: concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522**: concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8802**: concreto endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 11p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9204**: concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrica-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AUTIER, C.; AZÉMA, N.; BOUSTINGORRY, P. Using settling behaviour to study mesostructural organization of cement pastes and superplasticizer efficiency. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 450, p. 36-45, 2014.

BARBOSA, R. A.; ALVARENGA, R. C. S. S.; CARVALHO JUNIOR, A. N.; FERREIRA, R. T. L.; RODRIGUES, L. M.; CASTRO, L. O.; GARCIA, R. B.; SANTOS, W. J. Análise comparativa de métodos de obtenção do módulo de elasticidade para concreto preparado com areias natural e artificial. **Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal)**, v. 24, p. 151-161, 2015.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. *In*: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (Ed.) **Durabilidade do Concreto**: bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Ed. Tradução: CASCUDO, O.; CARASEK, H. São Paulo: IBRACON, p. 255-326, 2014.

BENTZ, D. P. A Three-Dimensional Cement Hydration and microstructure Program.

I. Hydration Rate, Tax of hydration and Chemical Shrinkage. **MarylandU.S. Departmente of Commerce**, Gaithersburg, 1995. Disponível em:

<<https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/2017/07/25/b96095.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2019.

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.

BRIZOLA, R. M. **Microestrutura do cobrimento de concretos com altos teores de escória e cinza volante ativadas por cimento Portland e cal hidratada**. 2007. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

BROOKS, J. J.; JOHARI, M. A. Effect of Metakaolin on Creep and Shrinkage of Concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 495-502, 2001.

CANESSO, F.; CORREA, E.; SILVA, A.; AGUILAR, M.; CETLIN, P. Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático do Concreto. *In*: 18º CBECiMat. Porto de Galinhas. **Anais [...]**. Porto de Galinhas, Brasil, 2008.

CASTELLANOS, N. T. **Estudio en estado fresco y endurecido de concretos adicionados con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC)**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2014.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25 °C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. **Materials Journal**, v. 99, n. 2, p. 119-128.

CASTRO, E. **Study of Concrete Strength by means of Small Cores and Sclerometry Essays**. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharias) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

CIGNA, R. et al. Corrosion of steel in reinforced concrete structures. *In*: COST Action 521 - Final Report. European Community: Luxembourg, 2003 *apud* MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 127 p.

CNS ELECTRONICS Operating. Manual of Erudite MK II Resonant Frequency Test System, 1995. 67p.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON – CEB. Diagnosis and assessment of concrete structures. State of the art report. **Bulletin 192**. Lausanne: CEB, 1989, 120 p.

COSTA, J. M.; AZZI, S. S. Comparação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto em cimento Portland CP IV. **Revista Construindo**, v. 8, p. 36-46, 2017.

DINAKAR, P. High reactive metakaolin for high strength and high performance concrete. 2011.

ESPAÑA. **UNE 83988-1**: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia). Asociación Española de Normalización y Certificación - AENOR, Madrid, España, 2008.

ESPAÑA. **UNE 83988-2**: Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividad – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Asociación Española de Normalización y Certificación - AENOR, Madrid, España, 2014.

FERDOSIAN, I.; CAMÕES, A.; RIBEIRO, M. High-Volume Fly Ash Paste for Developing Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 29, p. 157-161, 2017.

FOLIĆ, R. Durability design of concrete structures - part 1: analysis fundamentals durability design of concrete structures. **Architecture and Civil Engineering**. v. 7, n. 1., 2009, p.1-18.

FOLAGBADE, S.O. Absorption characteristics of cement combination concrete containing Portland Cement, fly ash, and metakaolin. **Civil Engineering Dimension**, v. 18, p. 57-64, 2016.

GAGLIARDO, D. P.; GAGLIARDO, J. C.; BARBOZA, L. S.; SILVA, M. B. M.; MASCIA, N. T. Módulo de elasticidade do concreto: comparativo de resultados a partir de ensaios estáticos e ensaios dinâmicos de resposta acústica. *In*: 55° IBRACON, 2013, Gramado. Anais do 55° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais[...]**. Ibracon, 2013.

GOWERS, K.; MILLARD, S. G. Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion. **ACI Materials Journal**, v. 96, n. 5, 1999.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique. *ACI Materials Journal*, v. 96, p. 536-541, 1999 *apud* MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**: fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 127 p.

GÜÇLÜER, K. Investigation of the effects of aggregate textural properties on compressive strength (CS) and ultrasonic pulse velocity (UPV) of concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 100949, 2020.

HALLYDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física - Vol. 3 - Eletromagnetismo**. LTC, 10. ed. Rio de Janeiro, 2014.

HANNACHI, S.; GUETTECHE, M. N. Application of the combined method for evaluating the compressive strength of concrete on site. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 2, p. 16, 2012.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre Docente) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HOMMER, H. Interaction of polycarboxylate ether with silica fume. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, p. 1847-1853, 2009.

HOPPE, J. F.; CINCOTTO, M. A.; PILEGGI, R. G. Técnicas de caracterização reológica de concretos. **Revista Concreto & Construções**, p. 108-124, 2007.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.

KINUTHIA, J.; WILD, S.; SABIR, B. B.; BAI, J. Self-Compensating Autogenous Shrinkage in Portland Cement - Metakaolin - Fly Ash Pastes. **Advances in Cement Research**, v. 12, p. 35-43, 2000.

LENCIONI, J. W.; LIMA, A. G. Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte. *In*: VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS, 2010, Córdoba, Argentina. **Anais [...]**. Córdoba, Argentina, 2010.

LI, Y.; ZHANG, Y.; ZHENG, J.; GUO, H.; YANG, C.; LI, Z.; LU, M. Dispersion and rheological properties of concentrated kaolin suspensions with polycarboxylate copolymers bearing comb-like side chains. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 34, p. 137-146, 2014.

LI, Z.; RANGARAJU, P. R. Development of UHPC Using Ternary Blends of Ultra-Fine Class F Fly Ash, Meta-kaolin and Portland Cement. *In*: INTERNATIONAL INTERACTIVE SYMPOSIUM ON UHPC, n. 1. Des Moines, IA: 2016. **Anais [...]**. Des Moines, 2016.

LOTENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

LUCO, L. F.; ANDRADE, C.; CLIMENT, M. A. On-site assessment of curing efficiency by means of electrical resistivity measurements. *In*: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROSTRUCTURAL-RELATED DURABILITY OF CEMENTITIOUS COMPOSITES, 11-13, abr. 2012, Amsterdam, Holanda. **Anais [...]**. Amsterdam, Holanda, 2012

MALHOTRA, V. M. In-situ/Nondestructive Testing of Concrete - A Global Review. SP-82, **American Concrete Institute**, Detroit, 1984.

MALHOTRA, V. M.; CARETTE, G. G.; BILODEAU, A.; SIVASUNDARAM, V. Some Aspects of Durability of High – Volume ASTM Class F (low – calcium) Fly Ash Concrete. **ACI Special Publication**, SP, v. 126, n. 65, 1991-82, 1991.

MALHOTRA, V. M.; SIVASUNDARAM, V. Ultrasonic methods. *In*: MALHOTRA V. M.; CARINO, N.J. (Ed.). **Handbook on Nondestructive Testing of Concrete**. Boston, USA: CRC Press, 2004.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; RAISDORFER, Janderson William; HOPPE, Juarez. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 125-139, 2017.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**: Fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: IFPB, 2017. 127 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: Microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014, 751p.

MENÉNDEZ, G.; BONAVETTI, V.; IRASSAR, E. F. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. **Cement Concrete Composites**, v. 25, p. 61-67, 2003.

MISURELLI, H.; MASSUDA, C. Paredes de concreto. **Revista TÉCNICA**, v. 17, n. 147, p. 74–80, 2009.

MOHAMAD, G.; CARMO, P. I. O.; OLIVEIRA, M. J.; TEMP, A. L. Métodos combinados para a avaliação da resistência de concretos. **Matéria**. Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 83-99, 2015.

MONFORE, G. E. The electrical resistivity of concrete. **Journal of Portland Cement Association**, n. 224, p. 35-48, 1968.

MUDULI, R.; MUKHARJEE, B. B. Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 398-414, 2019.

NARATTHA, C.; THONGSANITGARN, P.; CHAIPANICH, A. Thermogravimetry analysis, compressive strength and thermal conductivity tests of non-autoclaved aerated Portland cement–fly ash–silica fume concrete. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 122, n. 1, p. 11-20, 2015.

NAVARRETE, I.; LOPEZ, M. Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 384-390, 2016.

NAVARRO-BLASCO, I.; PÉREZ-NICOLÁS, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; DURAN, A.; SIRERA, R.; ALVAREZ, J.I. Assessment of the interaction of polycarboxylate superplasticizers in hydrated lime pastes modified with nanosilica or metakaolin as pozzolanic reactives. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 1-12, 2014.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Bookman Editora, 2015.

NETO, A; HELENE, P. R. Módulo de Elasticidade: Dosagem e Avaliação de Modelos de Previsão do Módulo de Elasticidade do Concreto. *In*: IBRACON 44<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. **Anais [...]**, Belo Horizonte, 2002.

NOBILE, L. Prediction of concrete compressive strength by combined non-destructive methods. **Meccanica**, v. 50, p. 411-417, 2015.

NOGUEIRA, J. R. S. **Avaliação da influência do método de mistura nas propriedades de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2015.

NOKKEN, M. R. Electrical conductivity to determine maturity and activation energy in concretes. **Materials and Structures**, v. 49, n. 6, p. 2209-2221, 2016.

NONAT, A. A hidratação dos cimentos. *In*: OLLIVIER, J. P.; VICHOT, A. (ed.). **Durabilidade do concreto: Bases científicas para formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Ed. Tradução: CASCUDO, O.; CARASEK, H., Cap. 2. São Paulo: IBRACON, p. 17-39, 2014.

PAGE, C. L.; PAGE, M. M. (Ed.). **Durability of concrete and cement composites**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 416 p., jul. 2007.

PANEDPOJAMAN, P.; TONNAYOPAS, D. Rebound hammer test to estimate compressive strength of heat exposed Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 387-395, 2018.

PAPO, A.; PIANI, L. Effect of various superplasticizers on the rheological properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2097-2101, 2004.

PELISSER, F.; VIEIRA, A.; BERNARDIN, A. M. Efficient self-compacting concrete with low cement consumption. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 324-332, 2018.

PEREIRA, E.; MEDEIROS, M. H. F. de. Ensaio de "Pull Off" para avaliar a resistência à compressão do concreto: uma alternativa aos ensaios normalizados no Brasil. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v. 5, n. 6, p. 757-780, Dec. 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952012000600003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000600003&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 26 maio. 2019.

POLDER R.; ANDRADE C.; ELSENER B.; VENNESLAND O.; GULIKERS J.; WEIDERT R.; RAUPAC, M. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, Rilem tc 154-emc: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. **Materials and Structures**, v. 33, p 603-611, dez. 2000.

PRESUEL-MORENO, F.; LIU, Y.; WU, Y. Y. Numerical modeling of the effects of rebar presence and/or multilayered concrete resistivity on the apparent resistivity measured via the Wenner method. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 16– 25, 2013.

PROCEQ S. A. Manual ultrassom Pundit Lab. 2017. Disponível em: <[https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms)>. Acesso em: 2 mar. 2019.

PROCEQ S. A. Manual Resipod. Instruções de Operação. Teste de durabilidade do concreto. 2017. Disponível em: <[https://www.proceq.com/uploads/tx\\_proceqproductcms](https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms)>. Acesso em: 19 fev. 2019.

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

RAAD, H. **Influência das Condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLIERE, A. M.; DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. *In*: 7<sup>o</sup> CONGRESSO INTERNACIONAL DE QUÍMICA DO CIMENTO. **Anais [...]**, Paris, 1980.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. *In*: RIBEIRO, D. V. (Ed.). **Corrosão em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e métodos de análise. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014a. p.87-118.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Efeito da adição da lama vermelha na corrosibilidade do concreto armado avaliado por meio de técnicas eletroquímicas. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.** São Paulo, v. 5, n. 4, p. 451-467, 2012 . Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-41952012000400004&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-41952012000400004&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 27 maio, 2019.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUZA, C.; ALMEIDA, F.; CUNHA, M.; LOURENÇO, M.; HELENE, P. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e métodos de análise. Editora Campus, 2014.

SABBAG, N.; UYANIK, O. Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. **Journal Applied Geophysics**, v. 141, p. 13–23, 2017.

SAJID, S. H.; ALI, S. M.; CARINO, N. J.; SAEED, S.; SAJID, H. U.; CHOUINARD, L. Strength estimation of concrete masonry units using stress-wave methods. **Construction and Building Materials**, v. 163, p. 518-528, 2018.

SALES, R. B. C.; SALES, F. A.; FIGUEIREDO, E. P.; SANTOS, W. J.; MOHALLEN, N. D. S.; AGUILAR, M. T. P. Durability of mortar made with fine glass powdered particles. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2017, 2017.

SANTOS, Bruna Silva; ALBUQUERQUE, Diana Dias Mariano; RIBEIRO, D. Veras. Efeito da adição do metacaulim na carbonatação de concretos de cimento Portland. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 13, p. 1-18, 2020. SARTORI, A. L.; BARBOZA, L. S.; OLIVEIRA, E. S.; BRITO, K. O.; LIMA, T. C. R. Módulo de elasticidade estático e dinâmico para concretos leves. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 5, p. 32-51, 2018.

SCHABOWICZ, K.; STERNIUK, A.; KWIECINSKA, A.; CERBA, P. Comparative analysis of selected non-destructive methods for concrete diagnosis. *In*: IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2018. p. 032063.

SCOTT, A.; ALEXANDER, M. G. Effect of supplementary cementitious materials (binder type) on the pore solution chemistry and the corrosion of steel in alkaline

environments. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 45-55, nov. 2016.

SHARIATI, M.; RAMLI-SULONG, N. H.; SHAFIGH, P.; SINAEL, H. Assessing the strength of reinforced concrete structures through Ultrasonic Pulse Velocity and Schmidt Rebound Hammer tests. **Science Research Essays**, v. 6, p. 213-220, 2011.

SHEKARCHI, M.; BONAKDAR, A.; BAKHSHI, M.; MIRDAMADI, A.; MOBASHER, B. Transport properties in metakaolin blended concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2217-2223, 2010.

SHIH, Y.; WANG, Y.; LIN, K.; CHEN, C. Improving Non-Destructive Concrete Strength Tests Using Support Vector Machines. **Materials**, v. 8, p. 7169-7178, 2015.

SHULL, P. **Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques and Applications**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002.

SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3-4, p. 392-400, 2009.

SILVA, F. B. S. Paredes de concreto armado moldadas in loco. **Téchne**, n. 167, 2011.

SILVA, L. M. A. **Resistividade elétrica superficial do concreto**: influência da cura. 2016. 68 f. Trabalho final de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

SINGH, N.; SINGH, S. P. Carbonation and electrical resistance of self-compacting concrete made with recycled concrete aggregates and metakaolin. **Construction Building Materials**, v. 121, p. 400-409, 2016.

SMALLWOOD, I.; WILD, S.; MORGAN, E. The resistance of metakaolin (MK)–Portland cement (PC) concrete to the thaumasite-type of sulfate attack (TSA) – Programme of research and preliminary results. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 931-938, 2003.

SOEIRO, J. M.; COSTA, S. S.; SILVA, A. P.; CHAHUD, E. Ensaio não destrutivo – ensaio de ultrassom e pacômetro na avaliação da qualidade do concreto armado. *In*: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA - CONTECC. **Anais [...]**, Maceió, 2018.

SPALVIER, A.; HALL, K.; POPOVICS, J. S. Comparative Study of Rebound Hammer, Nitto Hammer, and Pullout Tests to Estimate Concrete In-Place Strength by Using Random Sampling Analysis. **Transportation Research Record**, v. 2629, n. 1, p. 104-111, 2017.

TARUN R.; NAIK, V.; MALHOTRA, M.; POPOVICS, J. S. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. *In*: The Handbook of Nondestructive Testing of Concrete. Cap. 8, 2004.

TAYLOR, H. F. W. Cement chemistry. 2. ed. Aberdeen, Escócia: **Thomas Telford Publishing**, 1997. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1>

680/cc.25929.fm>. Acesso em: 12 set. 2020.

TEODORO, R.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Uso de pulso ultrassônico para a avaliação de concretos contendo diferentes tipos de metacaulim de alta reatividade. *In: XXXVI CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO - CONAEND. Anais [...]* São Paulo, 2018.

WAGH C. D.; MANU S. N.; DINAKAR, P. Rheological Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete with Metakaolin. *In: BISHNOI S. (eds) **Calcined Clays for Sustainable Concrete***. RILEM Bookseries, v. 25. Singapore: Springer, 2020.

WANG, Y. R.; KUO, W. T.; LU, S. S.; SHIH, Y. F.; WEI, S. S. Applying support vector machines in rebound hammer test. **Advances Materials Research**, v. 853, p. 600-604, 2014.

WENNER, F. **A method for measuring earth resistivity**. *In: Bulletin of the Bureau of Standards* nº 15. Washington, 1915.

WHITTINGTON, H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. **Magazine of concrete research**, v. 33, n. 114, p.48-60, 1981.

WIEDERMANN, W.; HAGMANN, M. Asymmetric properties of the Pearson correlation coefficient: Correlation as the negative association between linear regression residuals. **Communications in Statistics-Theory and Methods**, v. 45, n. 21, p. 6263-6283, 2016.

WILSON, J. B. **The electrical properties of concrete**. 1986. Tese (Doutorado) – Universidade de Edinburgh, Departamento de Engenharia Elétrica. Escócia, 1986.

WONGKEO, W.; THONGSANITGARN, P.; CHINDAPRASIRT, P.; CHAIPANICH, A. Thermogravimetry of ternary cement blends. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, v. 113, n. 3, p. 1079-1090, 2013.

XU, Q.; HU, J.; RUIZ, M. J.; WANG, K.; GE, Zhi. Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters. **Thermochimica Acta**, 2010.

ZACCARDI, Y. A. V.; DI MAIO, A. A. Electrical resistivity measurement of unsaturated concrete samples. **Magazine of Concrete Research**, v. 66, n. 10, p. 484-491, 2014.

ZHANG, M. H.; MALHOTRA, V. M. Characteristics of a thermally activated aluminosilicate pozzolanic material and its use in concrete. **Cement Concrete Research**, v. 25, n. 8, p. 1713-1725, 1995.