



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Construção
Civil
Mestrado em Materiais de Construção



Eduardo Brandão Diniz Lage

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA
QUALIDADE DO CONCRETO: RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E
VOLUMÉTRICA EM CORPO DE PROVA

Belo Horizonte
Maio / 2018

Eduardo Brandão Diniz Lage

**COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA
QUALIDADE DO CONCRETO: RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E
VOLUMÉTRICA EM CORPO DE PROVA**

Dissertação de mestrado em construção civil apresentado à Universidade Federal de Minas Gerais na Escola de Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Construção Civil como requisito para a conclusão do curso de Mestrado em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Chahud

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguilár

Belo Horizonte

Maio / 2018

Eduardo Brandão Diniz Lage

**COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA
QUALIDADE DO CONCRETO: RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL E
VOLUMÉTRICA EM CORPO DE PROVA**

Projeto de dissertação de mestrado em construção civil apresentado à Universidade Federal de Minas Gerais na Escola de Engenharia pelo Programa de Pós-Graduação em Construção Civil como requisito para a conclusão do curso de Mestrado em Construção Civil.

Prof. Dr. Eduardo Chahud – Universidade Federal de Minas Gerais -Orientador

Prof^a. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar - Universidade Federal de Minas
Gerais - Coorientadora

Prof. Dr. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco – Universidade Federal de Minas
Gerais

Prof. Dr. Enio José Pazini Figueiredo – Universidade Federal de Goiás

Belo Horizonte

Maio / 2018

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Antônio e Dolores, meu agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade. Isso só me fortaleceu e me fez tentar não ser o melhor, mas a fazer o melhor de mim. Obrigado.

A minha irmã Marcela, e a meu sobrinho Lucas meu agradecimento especial, pois sem a paciência em me receber em sua casa, sem vocês eu não conseguiria concluir mais esta etapa em minha vida. Obrigado.

A Kelley que com muito companheirismo me ajudou a superar as angústias do dia-a-dia que cercam os trabalhos de pesquisa e a produção científica. Obrigado.

Os meus professores e mentores Maria Teresa, Eduardo Chahud e Luiz Melgaço sempre disponíveis e dispostos a ajudar, pois sem sua maestria e parceria não seria possível realizar mais esta etapa. Obrigado.

A meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos, que se tornaram verdadeiros amigos e ajudaram ao longo do curso e nos trâmites laboratoriais. Obrigado.

A todos os funcionários do Departamento de Materiais de Construção, limpeza e laboratório que ajudaram ativa ou passivamente. Vocês também foram um referencial de caráter e trabalhado para mim. Obrigado.

Como diria Exopo, “Unidos venceremos. Divididos, cairemos”. Ninguém vence sozinho, essa vitória é de todos vocês. Muito obrigado a todos.

“Querem que vos ensine o modo de chegar à ciência verdadeira? Aquilo que se sabe, saber que se sabe; aquilo que não se sabe, saber que não se sabe; na verdade é este o saber.” Confúcio

RESUMO

O controle de qualidade do concreto é normalmente associado à resistência mecânica à compressão. Em casos especiais, se controla a porosidade aparente, a resistência ao desgaste, a expansão devido a reação álcali-agregado, a resistência ao ataque dos íons cloretos, sulfetos e a resistência a carbonatação. A maior parte dessas características é avaliada por métodos destrutivos, porém existem outros métodos que podem avaliar a qualidade do concreto, como a análise da resistividade elétrica. No caso dos íons cloretos, ataque de sulfetos e carbonatação, existe a possibilidade de se avaliar a qualidade do concreto por meio do ensaio de resistividade elétrica superficial ou volumétrica. O ensaio superficial é amplamente utilizado para estudo de estruturas in loco enquanto o volumétrico se restringe a ensaios corpos de prova para controle de qualidade do concreto. São poucos os dados sobre as variáveis que afetam estes ensaios, especialmente o método volumétrico. Neste contexto, este trabalho estudar a correlação entre os dois métodos. Para tal se faz necessário analisar as variáveis que afetam os ensaios e Os resultados mostram que as variáveis que mais afetam os ensaios temperatura e teor de humidade do corpo de prova. Também se constatou que a resistência superficial corresponde a aproximadamente 2,5 da resistividade volumétrica

Palavras-chave: resistividade elétrica, concreto, método superficial e volumétrico.

ABSTRACT

The concrete quality control is usually associated with compressive strength. In special cases, it is controlling the porosity, wear resistance, the expansion due to reaction alkaline aggregate, resistance to attack by chloride ions, sulfides and resistance to carbonation. Most of these features is evaluated by destructive methods, but there are other methods that can assess the quality of the concrete, as the analysis of the electrical resistivity. In the case of chloride ions, sulfides attack and carbonation, it is possible to assess the quality of the concrete through the surface or volume resistivity test. The surface test is widely used to study structures in situ while the volumetric restricted to testing specimens for quality control of concrete. There are few data on the variables affecting these tests, especially the volumetric method. In this context, this work was to study the correlation between the two methods. To this end it is necessary to examine the variables affecting the tests and the results show that the variables that most affect the test temperature and moisture content of the test body. It was also found that the surface resistance of approximately 2.5 corresponds to the volume resistivity.

Key words: electrical resistivity, concrete, surface and volumetric method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: PIRÂMIDE DE GIZE	20
FIGURA 2: REVESTIMENTOS ROMANOS UTILIZANDO CIMENTO.....	21
FIGURA 3: TIPOS DE CIMENTOS PORTLAND.....	22
FIGURA 4: MATERIAIS PARA PENEIRAMENTO.....	25
FIGURA 5: PENEIRA GRANULOMÉTRICA	26
FIGURA 6: EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE POR FREQÜÊNCIA RESSONANTE.....	31
FIGURA 7: FIGURA DE FREQUÊNCIA RESSONANTE MÉDIA DOS MATERIAIS	32
FIGURA 8: VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO CONVENCIONAL	33
FIGURA 9: PRENSA DE COMPRESSÃO.....	33
FIGURA 10: MODELO DE MATERIAL PARA CÁLCULO DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	35
PARA DETERMINAR A RESISTIVIDADE ELÉTRICA, DEVE-SE CONHECER A SEÇÃO TRANSVERSAL, E O COMPRIMENTO DO MATERIAL. QUANTO MAIOR A SEÇÃO TRANSVERSAL (FIGURA 11), MENOR A RESISTÊNCIA, DEVIDO A FACILIDADE DA PASSAGEM DOS ELÉTRONS PELO MATERIAL. ASSIM, RELACIONANDO AS GRANDEZAS CITADA ACIMA, PODE-SE OBTER UMA EQUAÇÃO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA ELÉTRICA (EQUAÇÃO 1).....	35
FIGURA 12: PASSAGEM DE CORRENTE NO MATERIAL.....	36
FIGURA 13: RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA, LINHAS DE CORRENTE E POTENCIAL.....	39
FIGURA 14: RESISTIVIDADE SUPERFICIAL, LINHAS DE CORRENTE E POTENCIAL.....	40
FIGURA 15: CIRCUITO PARA MEDIÇÕES RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	42
FIGURA 16: FLUXOGRAMA DO PROJETO DE PESQUISA	44
FIGURA 17: ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO CIRCUITO.....	47
FIGURA 18: MONTAGEM DO MEDIDOR DE RESISTÊNCIA.....	48
FIGURA 19: MEDIDOR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	49
FIGURA 20: PRENSA HIDRÁULICA.....	50
FIGURA 21: EQUIPAMENTO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE	50
FIGURA 22: BALANÇA DE PRECISÃO	51
FIGURA 23: GRÁFICO DO TEMPO DE SATURAÇÃO DO CORPO DE PROVA EM DIAS.	54
FIGURA 24: RELAÇÃO ENTRE SATURAÇÃO E CÂMARA ÚMIDA	55
FIGURA 25: GRÁFICO DE VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA NO ENSAIO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA.....	56
FIGURA 26: ANÁLISE DOS TIPOS DE ÁGUA PARA RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	57
FIGURA 27: MASSA MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA DE ENSAIO PRELIMINAR CPII.....	60
FIGURA 28: MASSA MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA DE CPIII	61
FIGURA 29: MASSA MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA DE CPIV	61
FIGURA 30: MASSA MÉDIA DOS CORPOS DE PROVA DE CPV	62
FIGURA 31: MASSA DOS CORPOS DE PROVA DE CP VARIADOS.....	62
FIGURA 32: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA CPII.....	63
FIGURA 33: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL CPII.....	64
FIGURA 34: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE – CPII	64
FIGURA 35: GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DO CPII	65
FIGURA 36: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA CPII	66
FIGURA 37: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL CPII.....	66
FIGURA 38: GRÁFICO DE BARRAS COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS – CPII COMPRESSÃO.....	67

FIGURA 39: GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DO CPII	67
FIGURA 40: GRÁFICO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO CPII.....	68
FIGURA 41: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA CPIII.....	68
FIGURA 42: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL CPIII	69
FIGURA 43: GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE – CPIII	69
FIGURA 44: GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DO CPIII	70
FIGURA 45: GRÁFICO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA – CPIII COMPRESSÃO	71
FIGURA 46:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL – CPIII COMPRESSÃO	71
FIGURA 47:GRÁFICO DE BARRAS COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS – CPIII COMPRESSÃO.....	72
FIGURA 48:GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO – CPIII COMPRESSÃO	73
FIGURA 49:GRÁFICO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO – CPIII COMPRESSÃO.....	73
FIGURA 50:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA CPIV	74
FIGURA 51:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL CPIV	74
FIGURA 52:GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE – CPIV.....	75
FIGURA 53:GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DO CPIV	76
FIGURA 54:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA – CPIV COMPRESSÃO	77
FIGURA 55:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL – CPIV COMPRESSÃO.....	77
FIGURA 56:GRÁFICO DE BARRAS COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS – CPIV COMPRESSÃO.....	78
FIGURA 57:GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO – CPIV COMPRESSÃO	78
FIGURA 58:GRÁFICO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO –CPIV COMPRESSÃO.....	79
FIGURA 59:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA CPV.....	80
FIGURA 60:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL CPV	80
FIGURA 61:GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE – CPV.....	81
FIGURA 62:GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DO CPV	81
FIGURA 63:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA – CPV COMPRESSÃO	82
FIGURA 64:GRÁFICO DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL – CPV COMPRESSÃO.....	83
FIGURA 65:GRÁFICO DE BARRAS COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS – CPV COMPRESSÃO.....	83
FIGURA 66:GRÁFICO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO – CPV COMPRESSÃO	84
FIGURA 67:GRÁFICO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA À COMPRESSÃO –CPV COMPRESSÃO.....	84
FIGURA 68: GRÁFICO DE DISPERSÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA NOS CP VARIADOS	85
FIGURA 69: GRÁFICO DE DISPERSÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL NOS CP VARIADOS.....	85
FIGURA 70: GRÁFICO DE COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE ANÁLISE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL NOS CP VARIADOS	86
FIGURA 71: GRÁFICO DE DISPERSÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA A COMPRESSÃO NOS CP VARIADOS	86
FIGURA 72: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM CPII.....	87

FIGURA 73: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM CPII.....	88
FIGURA 74: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM CPII.....	88
FIGURA 75: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM CPII.....	89
FIGURA 76: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM CP VARIADOS.....	89
FIGURA 77: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA EM BARRAS DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM OS DIFRENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND	90
FIGURA 78: GRÁFICO DE ANALISE COMPARATIVA DA RAZÃO ENTRE OS MÉTODOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA CONFECCIONADOS COM OS DIFRENTES TIPOS DE CIMENTO PORTLAND	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: SERIES DE PENEIRA	27
TABELA 2: CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS DE ACORDO COM SUA GRANULOMETRIA.	27
TABELA 3: CLASSIFICAÇÃO DE AGREGADOS.....	28
TABELA 4: RELAÇÃO A/C E CLASSE DE AGRESSIVIDADE DO CONCRETO.....	30
TABELA 5: DIFERENÇA DE POROSIDADE PERCENTUAL MÉDIA	30
TABELA 6: MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DO CONCRETO	33
TABELA 7: RESISTIVIDADE ELÉTRICA DOS MATERIAIS.....	37
TABELA 8: PROBABILIDADE DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA	38
TABELA 9: RISCO DE CORROSÃO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA	38
TABELA 10: PENETRAÇÃO DE CLORETO.....	41
TABELA 11: ENSAIO PRELIMINAR.	45
TABELA 12: ENSAIO UM CPV.	45
TABELA 13: ENSAIO DOIS CPIV.....	46
TABELA 14: ENSAIO TRÊS CPIII	46
TABELA 15: ENSAIO QUATRO - CORPOS DE PROVA VARIADOS.....	46
TABELA 16: RESULTADOS DE MATERIAIS PARA CONTADO ENTRE ELETRODO E CORPO DE PROVA.....	53
TABELA 17: DADOS DOS CORPOS DE PROVA	58
TABELA 18: CONDIÇÕES DE ENSAIOS	59

LISTA DE SIGLAS

Ø	Diâmetro
Σ	Somatória
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARI	Alta resistência inicial
A/C	Relação água cimento
BC	Baixo Calor de Hidratação
BR	Brasil
cm	Centímetro
CP I	Cimento Portland 1
CP II	Cimento Portland 2
CP III	Cimento Portland 3
CP IV	Cimento Portland 4
CP V	Cimento Portland 5
CPB	Cimento Portland Branco
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
fck	Resistência característica a compressão do concreto
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kg/cm ²	Quilograma por centímetro quadrado
Ltda.	Limitada
m	Metro
m ²	Metro quadrado
MG	Minas Gerais
MPa	Unidade de medida – Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
RS	Resistência a sulfato
XIX	20 – numeral romano
XVIII	18 – numeral romano

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	7
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE SIGLAS.....	11
SUMÁRIO.....	12
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. JUSTIFICATIVA	15
1.2. OBJETIVOS.....	18
1.2.1. OBJETIVO GERAL	18
1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO	18
1.3. ESTRUTURA DO PROJETO DE DISSERTAÇÃO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. COMPOSTOS DO CONCRETO.....	19
2.1.1. AGLOMERANTE - CIMENTO PORTLAND	20
2.1.2. AGREGADOS - GRANULOMETRIA.....	24
2.1.3. INFLUÊNCIA DA ÁGUA NO CONCRETO.....	29
2.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO.....	31
2.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO DO CONCRETO	33
2.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	34
2.4.1. MÉTODO DE ANÁLISE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA.....	38
2.4.2. MÉTODO DE ANÁLISE DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL	40
3. MATERIAIS E MÈTODOS	43
3.1 MATERIAIS.....	43
3.2 MÉTODOS.....	43
3.2.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1. VARIÁVEIS QUE AFETAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	52
4.1.1. CONTATO.....	52
4.1.2. SATURAÇÃO, RELAÇÃO CÂMARA ÚMIDA E SUBMERSO	53

4.1.3.	FREQUÊNCIA DA FONTE	55
4.1.4.	TIPOS DE ÁGUA	57
4.2.	ESTUDO DA CORRELAÇÃO	58
4.2.1.	CONDIÇÕES DE ENSAIO	58
4.2.2.	MASSA DOS CORPOS DE PROVA	60
4.2.3.	ENSAIO PRELIMINAR CPII	63
4.2.4.	ENSAIO COM CPIII.	68
4.2.5.	ENSAIOS COM CPIV.	74
4.2.6.	ENSAIOS COM CPV.	79
4.2.7.	ENSAIO COM CP'S VARIADOS	85
4.2.8.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	Erro! Indicador não definido.
	PROPOSTAS FUTURAS	94
	REFERÊNCIA.....	96
	REFERÊNCIA ILUSTRATIVA.....	99

1. INTRODUÇÃO.

Diariamente o ser humano está em contato com materiais que são condutores ou isolantes elétricos. Cada material possui na sua estrutura atômica uma composição que possa facilitar a condução elétrica. Mas a diferença entre condutor e isolante está na quantidade de elétrons livres no material. (Halliday, 2010).

De acordo com David Halliday (2010), um condutor elétrico possui excesso de elétrons em sua camada de valência. Os elétrons que se posicionam nestas camadas são conhecidos como elétrons livres, o posicionamento destes elétrons faz com que a força de atração entre eles e o núcleo atômico seja baixa. Logo, eles têm facilidade de movimentação pelo material, fazendo com que o material seja um bom condutor. Exemplos de materiais bons condutores são os metais.

Os isolantes elétricos ou dielétricos são formados por materiais que não facilitam a movimentação de elétrons, pois eles possuem uma forte ligação entre os elétrons e o núcleo do átomo. Exemplos de materiais dielétricos é o isopor, a madeira seca, o vidro, a borracha, entre outros. (Halliday, 2010).

A propriedade que define o quanto um material resiste a passagem da corrente elétrica no seu interior é denominada resistividade elétrica. Quanto maior a resistência à eletricidade de um material maior será a dificuldade da corrente trespassar o objeto, o posto vale para o material de menor resistência. Dentro da sociedade vários itens utilizam, cotidianamente, da propriedade resistividade elétrica para seu funcionamento. Fornos elétricos, churrasqueiras elétricas, chuveiro, fiação elétrica entre outros produtos que aplicam a resistividade elétrica para gerar um produto. Mesmo que o cidadão não saiba, o tempo todo ele está cercado e utilizando esta propriedade do material.

O desenvolvimento das cidades no mundo, atualmente, tem como principal alavancador, a indústria Cimenteira. De acordo com, Juan de Las Cuevas Toraya (1999), a sociedade está presenciando a Era Cimento, no futuro talvez seja conhecida como a Idade do Cimento. A maioria das sociedades utiliza o cimento como base para erigirem suas construções, desde que o cimento Portland ficou conhecido no mundo. Sua resistência, trabalhabilidade, durabilidade, preço e as

infinitas possibilidades de construção ganharam notoriedade e respaldo. Como também a capacidade portante, facilidade de reparo, recuperação da estrutura e reforço de peça estrutural. Por isso o concreto é o segundo produto mais consumido mundialmente perdendo apenas para a água. (MEHTA, 1994).

O concreto é um material poroso e dependendo do teor de umidade ele apresenta características de um isolante. Um concreto apresenta alta resistência elétrica quando seco. Porém, o mesmo concreto se umedecido ou levado até o estado de saturação teria um valor de resistividade elétrica menor. O concreto, também, possui propriedades capacitivas (armazena carga elétrica), isso ocorre devido uma corrente elétrica poder induzir efeitos elevados de polarização no concreto, bem como no interior do material na poro-solução e na interface de fase sólida. (LAYSSI, 2015).

O método de resistividade elétrica do concreto, por ser uma técnica de análise não destrutiva, pode ser usado para monitorização e inspeção de estruturas feitas de concreto, bem como, detectar futuro potencial de corrosão da armadura.

1.1. JUSTIFICATIVA.

A taxa de corrosão do aço é uma das principais causas da deterioração de uma estrutura de concreto armado ao redor do mundo, principalmente em regiões marítimas. A principal causa da corrosão das armaduras é a entrada de íons de cloreto e dióxido de carbono pelo concreto. A corrosão ocorre quando íons penetram no cobrimento nominal, por isso a norma da ABNT NRB 6118 explana sobre a espessura do cobrimento nominal para cada classe de agressividade ambiental.

Iniciada a oxidação da armadura os produtos gerados pela corrosão (óxidos e hidróxidos de ferro) são depositados entre o aço e o concreto, criando uma tensão expansiva e conseqüentemente o rompimento do cobrimento da peça estrutural. Isto acarreta uma deterioração progressiva do concreto, resultando em altos custos para a reparação da edificação. (SONG, 2007).

A corrosão do aço em uma estrutura de concreto armado é uma ameaça para sua durabilidade e funcionalidade. Valores baixos de resistividade elétrica no

concreto pode gerar um risco de dano para a estrutura de concreto. Por isso é importante avaliar a camada de proteção, cobrimento nominal, do concreto armado. A avaliação pode determinar o estado de conservação da estrutura, sendo o primeiro passo no processo de reparação, base de estudo e decisões a serem tomadas no futuro, logo a resistividade elétrica para análise do concreto é utilizada para diagnóstico da qualidade do concreto. As decisões sobre as estratégias de reparo devem ser baseadas no conhecimento proposto por Polder (2000):

- A causa de dano ou perda de proteção;
- o grau e a quantidade de danos a armadura;
- o progresso esperado de danos com o tempo;
- o efeito de danos sobre o comportamento estrutural.

Para realizar o controle, manutenção e gerar o planejamento da restauração das estruturas, devem ser executados métodos de detecção não destrutivos e técnicas que premeditem a corrosão, monitorando as estruturas ao ponto de evitar que a corrosão, isto gera uma economia na manutenção das construções. Esta prevenção evita o laborioso trabalho de reparação e tratamentos especiais da zona de fraturas. Por conseguinte, o controle da taxa de corrosão pela porosidade das estruturas de concreto armado pode dar mais informação sobre sua durabilidade com o tempo. (POLDER, 2000).

Informações sobre o risco de danos baseados na corrosão do metal podem ser previstas por meio de análise da resistividade elétrica de um material, devido à sua estrutura estar exposta a cargas de íons de cloreto. A análise do método de resistividade elétrica do concreto pode ser relacionada à penetração de cloretos e a uma taxa de corrosão elevada. Isto porque, podem-se mapear, por análise de resistividade elétrica, os pontos mais porosos de um concreto. Estes pontos porosos são o ponto crítico de uma estrutura, pois as taxas de corrosão futura serão maiores neste setor por ele estar mais susceptível a penetração de cloreto. Com isto, pode-se prevê os pontos críticos e serem tomadas medidas preventivas para evitar a corrosão. Mesmo depois da estrutura ser afetada, a análise é relevante para possíveis ações de manutenção. (LIU, 2010)

A análise da resistividade não demonstra se está ativa, ou não, a corrosão no aço da estrutura. Pode-se obter esta informação com outras técnicas como análise de cloreto, medição da profundidade de carbonatação, mapeamento de potencial, medição de resistência de polarização e inspeção visual do aço. As informações dadas pelo método de análise de resistividade são adicionais como local propenso à corrosão. Assim pode-se escolher o método de reparação ou os locais necessários para a reparação pela análise feita nas medições da resistividade elétrica. Métodos como o de reparação eletroquímico são utilizados para reparar o possível dano detectado pela análise de resistividade elétrica. (POLDER, 2000).

Então, as medições podem ser funcionais para:

- Analisar o valor da resistividade do concreto em uma estrutura com intuito de estabelecer o potencial de risco de corrosão do aço da estrutura de concreto;
- determinar as partes mais permeáveis da estrutura, a fim de definir novas investigações ou medidas de proteção;
- localizar manchas com a exposição mais grave à água e espécies agressivas dissolvidos;
- ajudar os sistemas de design para proteção catódica e outros tratamentos eletroquímicos;
- controle da qualidade do concreto na fase de produção.

As medições de resistividade, de acordo com a ABNT NBR 9204/2012, podem ser executadas em qualquer parte da estrutura do concreto que estão expostos ao ar, sendo feitas em qualquer situação, porém, a temperatura deva estar superior a 0 °C.

As técnicas de medição de resistividade elétrica têm tido bastante aceitação, devido ser um método não destrutivo de análise que possibilita prever a corrosão da armadura. Mas os engenheiros necessitam de melhores técnicas para avaliar a condição da estrutura quando a manutenção ou reparação é necessária. (LAYSSI, 2015).

Embora a técnica seja muito simples de realizar, as medições de resistência elétrica do concreto não são muito confiáveis devido a uma gama de fatores que envolvem a técnica, além da microestrutura do concreto. (LIU, 2010)

Este trabalho tem como intuito realizar uma análise comparativa entre o método de resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto. Como também, fornecer detalhes técnicos e de orientação para a execução e interpretação das medições laboratoriais e das técnicas de resistividade elétrica do concreto para uso “*in loco*”.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL.

Analisar comparativamente os valores da resistividade elétrica obtida em corpos de prova de concreto pelos métodos de análise superficial e volumétrica.

1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Analisar as variáveis que afetam o ensaio de resistividade elétrica.
- Avaliar a possibilidade de uso da resistividade superficial para controle de qualidade do concreto
- Tentar uma correlação entre os dados obtidos

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A constituição da Dissertação está estruturada conforme descrito abaixo:

- No primeiro capítulo foi demonstrada a introdução ao assunto do trabalho, a sua justificativa para execução e os objetivos a serem analisados;
- No capítulo dois é apresentada uma revisão bibliográfica detalhada buscando explicar o estado atual da arte já produzida pela literatura;
- No capítulo três é desenvolvida a metodologia de pesquisa, baseada em dados fornecidos por autores referência no assunto, dados empíricos durante a pesquisa, além dos materiais utilizados para a realização da mesma.
- No capítulo quatro é apresentado, o resultado da pesquisa relatada na metodologia, em modelo de tabelas e gráficos desenvolvidos pelo autor.
- No capítulo cinco são apresentadas as considerações finais.

- E no último capítulo uma extensa referência bibliográfica utilizada para desenvolvimento da dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1. COMPOSTOS DO CONCRETO.

Os tijolos cerâmicos maciços utilizados pelos romanos eram unidos por uma espécie de concreto derivado de cinzas vulcânicas e cal. Esta realização dos romanos foi considerada, historicamente, como a primeira utilização do modelo de cimento que possuímos nos dias atuais. Porém, esta tecnologia romana foi esquecida durante a Idade Média, devido às dificuldades advindas das invasões

bárbaras ao modelo de vida na época. O retorno do concreto aos métodos construtivos ocorreu no século XIX. (HELENE, 2010).

O modelo de concreto utilizado na construção civil atual é baseado no material pozolânico conhecido como cimento Portland. Uma definição utilizada para definir o concreto consiste em caracterizar os materiais da seguinte forma:

- Aglomerante: cimento Portland;
- Agregado Miúdo: areia natural ou artificial (pó de pedra beneficiado), pó de pedra;
- Agregado Graúdo: pedra britada ou seixo natural;
- Água: pode ter parte ou totalidade substituída por gelo;
- Aditivo: plastificante, retardador de pega;
- Adições: metacaulim, cinza volante, pozolana, cal, pó de pedra.

2.1.1. AGLOMERANTE - CIMENTO PORTLAND

Os aglomerantes cimentícios estão espalhados pela história, várias civilizações se ergueram mediante a pasta criada por diferentes tipos de aglomerantes. A história do concreto está ligada a história dos aglomerantes, principalmente a do cimento Portland criado no século XIX. O principal componente do concreto é o cimento, este produz a reação química de formação da pasta aderente, a qual torna o concreto tão eficiente.

Os egípcios (FIGURA 1) utilizavam gesso calcinado como aglomerante, os romanos (FIGURA 2) obtinham a pozolanicidade através de uma massa obtida pela hidratação de cinzas vulcânicas, mas foi apenas no século XVIII que começou a se criar o modelo de cimento que temos hoje em dia. James Parker descobriu, em 1791, e patenteou em 1796, um cimento com o nome de Cimento Romano. Este era composto por sedimentos de rochas da ilha de Sheppel e ganhou destaque com as pesquisas e publicações feitas pelo engenheiro francês Louis José Vicat em 1818. (KAEFER, 1998).

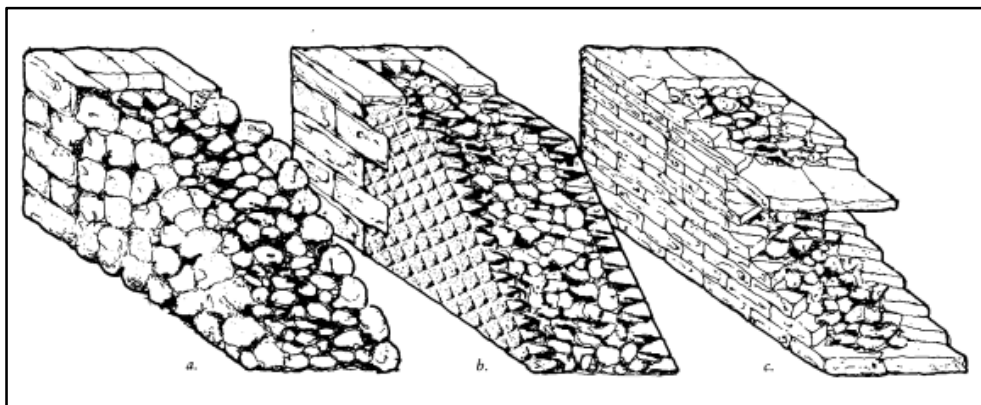
FIGURA 1: Pirâmide de Gize



Fonte: KAEFER, 1998.

O Cimento Portland é um aglomerante hidráulico artificial, obtido pela moagem de clínquer *Portland*, proveniente da queima de calcário e argila, finamente moídos e misturados, sob temperatura de 1450°C, com corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera promovida pelo inglês Joseph Aspdin, em 1824. Seu nome derivou-se em menção às rochas da ilha britânica de Portland, material de construção muito conhecido e utilizado na época. O cimento Portland obtido apresentava cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes às rochas da ilha. (KAEFER,1998).

FIGURA 2: Revestimentos romanos utilizando cimento



Fonte: KAEFER, 1998.

Apesar do nome, o cimento hoje conhecido como Portland (FIGURA 3) não é o mesmo material, isso ocorre, porque o cimento moderno é obtido pela queima de uma mistura definida de rocha calcária e argila, finamente moídas, até sua fusão incipiente, resultando numa substância denominada clínquer.

FIGURA 3: Tipos de cimentos Portland



Fonte: CINTRA, 2013.

O mercado da construção civil brasileiro dispõe de oito tipos de cimentos tradicionais, entre eles:

- O Cimento Portland Comum (CP I) que é um cimento sem quaisquer adições, com a exceção do gesso. Este cimento é muito utilizado para controle de pega, sendo utilizado para construções em geral quando não é necessária utilização de alguma propriedade especial. É normatizado pela ABNT NBR 5732;
- o Cimento Portland Composto (CP II) é composto por adições de escória, pozolana ou fíler em pequenas proporções. Sua composição segue a norma ABNT NBR 11578;
- o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III) contém escória de alto forno numa taxa de 35 a 70% de sua massa. Este cimento é muito utilizado em obras de concreto massa, por apresentar baixo calor de hidratação, e apesar de ter uma maior impermeabilidade e durabilidade, falta resistência à expansão. Ele é normatizado pela ABNT NBR 5735;
- o Cimento Portland Pozolânico (CP IV) contém, em sua massa, pozolana variando de 15 a 50%. É recomendado para ambientes agressivos com exposição a água devido a sua baixa permeabilidade. Além desta característica o CPIV possui alta durabilidade e alta resistência à compressão a idades avançadas; É normatizado pela ABNT NBR 5736;
- o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI) é conhecido por atingir altas resistências a compressão nos primeiros dias de aplicação. Por ter uma resistência inicial alta ele não precisa utilizar a cura em 28 dias. Muito utilizado em fábricas ou empreendimentos que

necessitam de um cimento de elevada resistência inicial para a rápida desforma. Normatizados pela ABNT NBR 5733;

- o Cimento Portland Resistente a Sulfatos (RS) é um cimento utilizado em obras de ambientes agressivos, como redes de esgotos e obras em regiões litorâneas, subterrâneas e marítimas. Normatizado pela ABNT NBR 5737
- o Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação (BC) apresenta uma dissipação mais prolongada do calor gerado durante a hidratação do cimento. É recomendado para grandes concretagens onde é indispensável o controle de fissuras de origem térmica, como em obras hidráulicas. Este cimento é definido pela ABNT NBR 13116;
- e o Cimento Portland Branco (CPB) é um cimento de coloração diferenciada da coloração natural cinza. Obtido de matérias primas com baixo teor de ferro. Sua utilização é em projetos arquitetônicos de concreto aparente e para composição de argamassas para rejunte de azulejos e outras aplicações não estruturais. Regido pela ABNT NBR 12989.

O cimento com a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, e que após entrar em contato com a água é submetido a processos de transformações químico-mineralógicas, colaboram para coser os agregados, resultando no compósito concreto de cimento Portland. A dosagem e mistura dos agregados com o material pozolânico pode-se resultar em massas específicas diferentes no concreto, caracterizando-se pelo concreto leve de densidade com valor abaixo do intervalo estabelecido para o concreto normal, obtida com o uso de agregados com menor massa específica. De baixo custo, mais rápido e de fácil aplicação. O concreto de densidade normal com massa específica no intervalo de 2000 a 2800 kg/m³. E o concreto pesado com massa específica acima do intervalo estabelecido para o concreto normal, devido ao uso de agregados de alta densidade.

Segundo a ABNT NBR 8953, os concretos podem ser classificados, segundo sua resistência à compressão em concreto de baixa resistência o f_{ck} é menor que 20 MPa (não adequado à finalidade estrutural, segundo a ABNT NBR 6118),

o concreto de resistência a compressão normal está com o fck entre 20 MPa e 50 MPa e o concreto de alta resistência: fck é maior que 50 MPa.

2.1.2. AGREGADOS - GRANULOMETRIA

A denominação do agregado, na construção civil, refere-se a parte que é adicionada a água e o cimento para compor o composto concreto. Antigamente este termo era chamado de inerte, devido acreditar-se que não fazia parte da reação de pega e da rigidez do cimento. Porém, hoje em dia sabe-se da importância e da influência dos agregados na absorção, densidade e dureza do concreto. (NEVILLE, 2015).

Os agregados mais utilizados na construção civil são a areia e a brita. Estes possuem volumes aleatórios, facilitando a elaboração do concreto ou argamassa, devido a variação de dimensões e propriedades do aglomeramento. O custo reduzido dos agregados é outro parâmetro importante para continuar a ser utilizado na construção civil, reduzindo assim o preço do concreto. (NEVILLE, 2015).

De acordo com a ABNT, NBR 7211, os agregados podem ser classificados quanto a massa unitária e ao tamanho. A classificação quanto sua massa pode ser determinada em leve, normal e pesado. A relação entre a massa do agregado e o volume ocupado pelos grãos, incluindo os vazios, é denominada de massa unitária, que é o que classifica os agregados:

- Leve: São agregados que possuem massa unitária menor do que 1 kg/dm³. Escória, vermiculita, argila expandida são exemplos de agregados leves.
- Normal: São agregados que possuem massa unitária entre 1 e 1,7 kg/dm³. Areia quartzosa, pedra britada, seixo e cascalho são exemplos de agregados médios.
- Pesado: São agregados que possuem massa unitária maior do que 1,7 kg/dm³. A hematita, a magnetita e a barita são exemplos de agregados pesados.

Os agregados para concreto podem ser separados como agregado miúdo e agregado graúdo. A Norma da ABNT, NBR 7211, determina as características dos agregados graúdos e miúdos, de origem natural ou britamento. O agregado miúdo é a areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de malha 4,8 mm e ficam retidos na peneira de malha 0,075 mm. Já o agregado graúdo é considerado graúdo quando os grãos passam pela peneira de abertura 76 mm e fica retida na peneira de malha de 4,8mm, a classificação das britas varia de acordo com a peneira que ela é retida:

- Brita 0: de 4,8 mm a 9,5 mm;
- brita 1: de 9,5 mm a 19 mm;
- brita 2: de 19 mm a 38 mm;
- brita 3: de 38 mm a 76 mm;
- brita 4: acima de 76 mm.

A Granulometria ou Análise Granulométrica é um ensaio de medição das dimensões dos grãos (FIGURA 4) que constituem a amostra do solo. Determina as dimensões do agregado e a porcentagem de ocorrência dos variados tamanhos. (ABNT, NM 248:2001).

FIGURA 4: materiais para peneiramento.



Fonte: Autor 2017

De acordo com a ABNT, NM 248:2001, o objetivo do ensaio possibilita através do peneiramento obter a curva granulométrica, determinar as dimensões individuais, as características físicas e estudar a distribuição dos agregados. A motivação para a realização do ensaio é determinar se a composição granulométrica influi diretamente para a resistência e as propriedades de concretos e argamassas.

O principal ensaio de granulometria é realizado através do peneiramento (FIGURA 5), esse ensaio consiste em peneirar o agregado através de uma vasta malha de peneiras de tamanhos variados (TABELA 1). Mas existem outros métodos para realizar o ensaio de granulometria, que de acordo com determinada situação torna favorável sua escolha:

- Peneiramento, utilizado quando se tem solos granulares;
- sedimentação, utilizado quando tem-se solos argilosos;
- combinação, quando utiliza-se os processos de peneiramento e sedimentação;

FIGURA 5: peneira granulométrica



Fonte: Autor (2017)

TABELA 1: series de peneira

<i>Serie Normal / Série Normal</i>	<i>Serie Intermedia / Série Intermediária</i>
75 mm	-
-	63 mm
37,5 mm	50 mm
--	-
--	31,5 mm
19 mm	25 mm
-	-
9,5 mm	12,5 mm
-	-
4,75 mm	6,3 mm
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 µm	-
300 µm	-
150 µm	-

Fonte: ABNT, NM 248:2001.

A ABNT, em sua norma NBR 6502/1995, dispõe a classificação rochosa brasileira de acordo com o tamanho dos grãos, conforme demonstra a TABELA 2.

TABELA 2: classificação dos solos de acordo com sua granulometria.

Classificação Rochosa	Diâmetro dos Grãos
Bloco de Rocha	$d > 1000$
Matacão	$200 < d \leq 1000$
Seixo	$60 < d \leq 200$
Grânulo	$2 < d \leq 60$
Areia Grossa	$0,6 < d \leq 2$
Areia Média	$0,2 < d \leq 0,6$
Areia Fina	$0,06 < d \leq 0,2$
<u>Silte</u>	$0,002 < d \leq 0,06$
Argila	$d \leq 0,002$

Fonte: ABNT NBR 6502/195

Assim, conhecendo a distribuição granulométrica do agregado e representando-o através de uma curva gráfica, torna-se possível determinar suas características. A classificação de agregados é demonstrada na norma NM 248:2001. Agregados - Determinação da composição granulométrica, como mostra a TABELA 3 abaixo:

TABELA 3: classificação de agregados.

Classificação dimensional dos agregados	
Agregado graúdo	4,75mm (nº4) / 75mm(3")
Agregado miúdo	0,150mm(#100) / 4,75 mm
Pedrisco	4,75 mm / 12,5 mm (1/2")
Pó de pedra	<6,3 mm (1/4")
<u>Filler</u>	< 0,150mm

Fonte: ABNT, NM 248:2001

As normas que trabalham a granulometria são a NBR 7211- Agregado para concreto – Especificação, 1983, a NBR 5734 – Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico - especificação e a NBR 7217 – Determinação granulométrica da composição dos agregados – Método de ensaio, NM 248:2001. Agregados -

Determinação da composição granulométrica e NM 26:2000. Agregados - Amostragem / Agregados.

Os agregados têm uma pequena influência no monitoramento da resistividade elétrica do concreto, sua resistividade elétrica dos agregados é bem maior que a da pasta de cimentos Portland, assim a grande parte da corrente é conduzida pela pasta. Isto acarreta que as alterações na consistência da pasta de cimento influenciam muito mais que a mudanças nos agregados. Porém, ocorrendo uma adição na quantidade de agregado, tende a aumentar a resistividade elétrica, isto devido obstruções na passagem da corrente elétrica, aumentando assim o percurso a ser seguido pelo elétron. Assim, quanto maior a quantidade de agregados maior será o valor medido da resistividade elétrica. (LENCIONI, 2010).

2.1.3. INFLUÊNCIA DA ÁGUA NO CONCRETO

Um componente importante para o concreto é a água, sua função é provocar uma reação de hidratação nos componentes do concreto e aumentar a trabalhabilidade do mesmo. A água é tão importante quanto o cimento para a criação do concreto, sua quantidade pode determinar a dosagem de aditivos, porosidade do concreto e a resistência mecânica. Sendo importante, também para realizar a reação de hidratação do concreto, esta reação é essencial para formar uma estrutura compacta e desenvolver a resistência e durabilidade do concreto. As reações de hidratação diminuem de velocidade com o tempo. (SILVA, 2016).

A água utilizada para a confecção do concreto, de acordo com a norma da ABNT, NBR 12655/2015, deve ser armazenada em caixas estanques e tampadas, com a finalidade de evitar a contaminação por substâncias nocivas ao concreto. Outra norma que especifica a água utilizada no concreto é a norma da ABNT, NBR 15900, cuja água deve ser examinada e ter um mínimo de impureza possível descrito nos ensaios. Está incluída nesta exigência a água utilizada sob a forma de gelo

A norma da ABNT, NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento estabelece critérios de utilização da água para durabilidade dos

projetos de estruturas, tanto quanto uma correlação entre a relação água/cimento e a resistência à compressão. Na TABELA 4 estão apresentados os valores máximos da relação a/c em função das classes de agressividade ambiental e tipo do concreto. Os cuidados desta norma propõem a redução da porosidade com intuito de prolongar a vida útil e aumentar a resistência mecânica. A adição extra de água prejudica a resistência e aumenta a porosidade.

TABELA 4: Relação a/c e classe de agressividade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m ³	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360
CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: ABNT NBR 12655/2015

A relação água cimento é diretamente proporcional à resistência mecânica. A adição de água além da quantidade estipulada na dosagem pode aumentar o abatimento acima do limite especificado. Embora aparentemente facilite a aplicação, faz com que o volume de vazios dentro da massa do concreto também aumente, diminuindo sua resistência mecânica e comprometendo, muitas vezes, o próprio desempenho da estrutura, facilitando a entrada de agentes agressivos ao concreto. (ISAIA, 2007).

A água provoca vazios/poros (TABELA 5) no concreto que influem diretamente na durabilidade e na vida útil das estruturas, proporcionando retração e fissuração. Além disso, facilitam o caminho de penetração de agentes agressivos que podem trazer consequências danosas para a durabilidade. Por isso alguns ensaios, como o de resistividade elétrica é importante para controle de qualidade do concreto. (PESSOA, 2014).

TABELA 5: Diferença de porosidade percentual média

Concreto	Porosidade Superficial Média (%)		Porosidade Volumétrica (%)
	Escâner	Microtomografia por Raio X	NBR 9778 (2005)
20 MPa	1,7	1,0	1,9
30 MPa	1,6	1,6	2,1

Autor: PESSOA, 2014.

Lubeck apud Andrade (2008) expõe que a resistividade elétrica do concreto está diretamente ligada a quantidade de poros existentes e a conectividade entre eles. Outra utilização da resistividade elétrica é a medição em concretos não saturados, esta medição pode relacionar ao grau de saturação do mesmo.

2.2. MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

FIGURA 6: Equipamento de medição do módulo de elasticidade por frequência ressonante



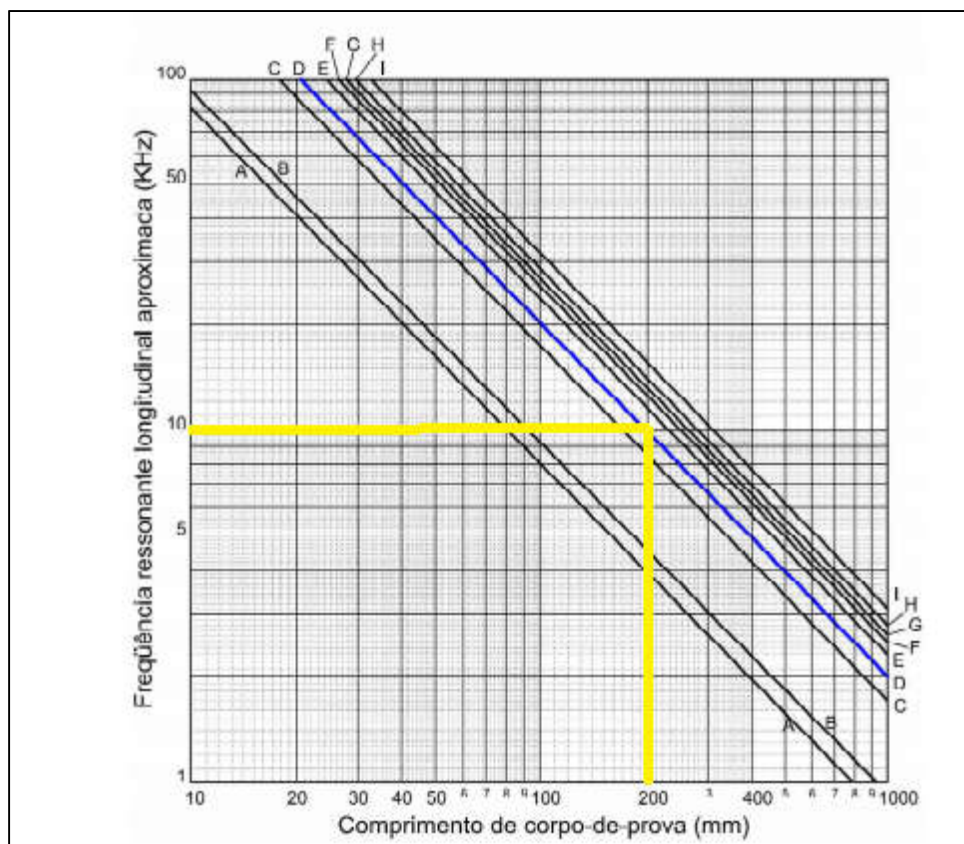
Fonte: Autor, 2017.

O módulo de elasticidade é um parâmetro que determina a rigidez de um material. O módulo é uma propriedade inerente ao material, pois, este depende da composição que é feito, relação química, valores da microestrutura,

porosidade e trincas. Um dos aparelhos utilizados para medir o módulo de elasticidade utiliza a frequência ressonante, conforme FIGURA 6.

O desempenho do concreto para uso em estruturas e seus componentes é usualmente avaliado pela tensão de ruptura sob cargas de compressão, pelo módulo de elasticidade e pela porosidade. Como a maioria dos métodos são por ensaios destrutivos, a medição do módulo de elasticidade por frequência ressonante se torna interessante por ser um método de ensaio não destrutivo. Pode-se determinar o módulo de elasticidade por frequência ressonante baseando em valores médios de materiais diversos utilizando a FIGURA 7 abaixo. Logo, para um corpo de prova de diâmetro 10 cm, aos 28 dias, a frequência de 10 KHz. (ALMEIDA, 2012).

Figura 7: Figura de frequência ressonante média dos materiais



Fonte: Almeida, 2012.

Para determinar o módulo de elasticidade por frequência ressoante deve-se conhecer a sua massa, volume e o comprimento do corpo de prova. Valores

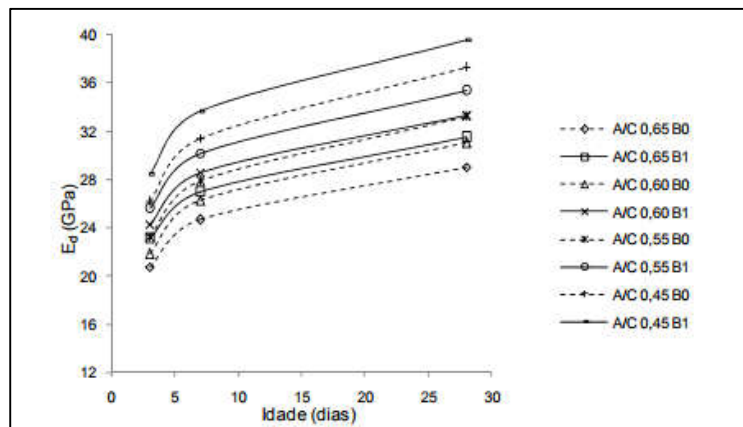
médios do módulo de elasticidade dinâmico do concreto obtidos por Almeida (2012) são demonstrados abaixo na TABELA 6 e no FIGURA 8.

TABELA 6: Módulo de elasticidade dinâmico do concreto

	E_d (GPa)		
	3 dias	7 dias	28 dias
A/C 0,65 B0	20,75	24,67	29,05
A/C 0,60 B0	21,86	26,25	31,05
A/C 0,55 B0	23,25	27,87	33,14
A/C 0,45 B0	26,15	31,40	37,27
A/C 0,65 B1	23,05	26,96	31,47
A/C 0,60 B1	24,25	28,56	33,35
A/C 0,55 B1	25,56	30,16	35,36
A/C 0,45 B1	28,46	33,67	39,55

Fonte: Almeida, 2012.

FIGURA 8: valores do módulo de elasticidade do concreto convencional



Fonte: Almeida, 2012.

2.3. ENSAIO DE COMPRESSÃO DO CONCRETO

Um ensaio mecânico realizado em materiais é o teste de compressão, este serve para conhecer o comportamento e suas propriedades quando submetido a tensão de compressão. Este teste é usualmente aplicado em concreto, cerâmicas, plásticos e compósitos. O teste de resistência do concreto (FIGURA 9) é feito pelo método do ensaio de compressão axial. No ensaio de compressão é exercida uma força gradual de compressão sobre o CP até que o mesmo venha a romper. A resistência à compressão do concreto é obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova, e expressa em MPa. (NBR 5739:2007).

FIGURA 9: Prensa de compressão



Fonte: Autor, 2017.

Segundo a ABNT, NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos-, dependendo do formato e tamanho do corpo de prova deve-se usar um método diferenciado, isso permitirá que consiga controlar a carga sobre o corpo-de-prova. A movimentação do equipamento é vertical mantendo paralelismo entre os pratos de compressão. O corpo de prova deve ser posicionado bem ao centro dos pratos, fazendo com que as resultantes de força passem corretamente ao centro do corpo de prova.

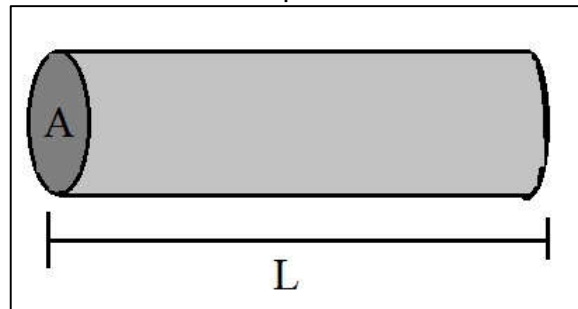
Após a aplicação de uma pequena carga inicial de acomodação, o prato não deve mais movimentar-se em sentido algum durante todo o transcorrer do ensaio. O carregamento do ensaio deve ser aplicado continuamente e sem choques, com velocidades entre 0,3 MPa/s e 0,8 MPa/s.

2.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.

A resistividade elétrica é definida como resistência a passagem da corrente elétrica e é considerada uma propriedade física dos materiais. No caso do concreto é uma análise importante, pois está diretamente relacionada à probabilidade de corrosão das armaduras contidas nas peças de concreto armado, por íons de cloretos. A resistividade elétrica do concreto pode ser obtida através dos métodos de análise superficial e volumétrico. (LENCIONI, 2010).

Quando há uma diferença de potencial em um material, movimento dos elétrons livres no seu interior, uma corrente elétrica é instituída, esta corrente tende a atravessar o material do menor polo para o maior. O choque dos elétrons livres do material com os da corrente elétrica provoca a resistência. Essa dificuldade de passar os elétrons livres do material é que se denomina resistência elétrica. A resistência elétrica depende da natureza do material utilizado, do comprimento L (m) e da seção transversal A (m²), como mostra a FIGURA 10 abaixo: (HALLIDAY, 2010).

FIGURA 10: modelo de material para cálculo de resistência elétrica.



Fonte: MENDES (20XX)

Assim, quanto maior a seção transversal menor a resistência, pois o aumento da seção facilita a passagem das cargas elétricas devido à existência de uma área maior. O comprimento do material é diretamente proporcional à resistividade elétrica, pois quanto maior o comprimento, maior a resistência à passagem de carga, isto é, devido à carga ter um caminho mais longo para percorrer, aumentando os choques entre as cargas internas, e gerando uma maior perda da energia cinética. (HALLIDAY, 2010).

Outro fator importante é a natureza do material, que também influi diretamente na resistividade. Isto ocorre porque quanto mais elétrons livres o material tiver mais facilmente ele constitui uma corrente elétrica. Essa característica de cada material denomina-se resistividade elétrica.

Para determinar a resistividade elétrica, deve-se conhecer a seção transversal, e o comprimento do material. Quanto maior a seção transversal (FIGURA 11), menor a resistência, devido a facilidade da passagem dos elétrons pelo material.

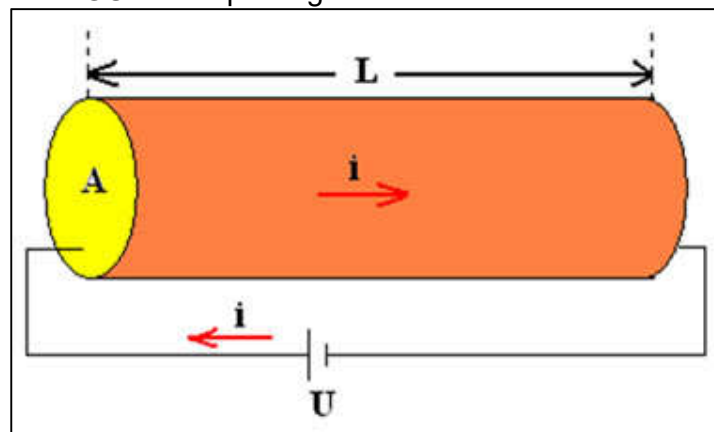
Assim, relacionando as grandezas citada acima, pode-se obter uma equação para determinar a resistência elétrica (EQUAÇÃO 1).

EQUAÇÃO 1:
$$R = \frac{(\rho L)}{A}$$

Onde que:

- R é a resistência elétrica (Ω/m);
- ρ é a resistividade elétrica específica do material ($\Omega.m$);
- L é o comprimento (m);
- A é a área de seção transversal (m^2).

FIGURA 12: passagem de corrente no material



Fonte: SILVA 20XX.

Para a obtenção do valor da resistividade elétrica basta reescrever a equação, obtém-se a EQUAÇÃO 2:

EQUAÇÃO 2:
$$\rho = \frac{(A.R)}{L}$$

Cada material possui uma resistividade elétrica diferente. A tabela a seguir demonstra alguns materiais e a sua resistividade elétrica (TABELA 7).

Materiais ditos condutores são os materiais que possuem baixa resistividade elétrica, normalmente são materiais metálicos. Valores mais altos são materiais considerados não condutores como a borracha, o vidro e o concreto. (HALLIDAY, 2010).

TABELA 7: resistividade elétrica dos materiais.

Material	Resistividade ($\Omega.m$)
Prata	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Ouro	$2,4 \cdot 10^{-8}$
Carbono	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Silício	$2,5 \cdot 10^2$
Concreto	De 10^1 a 10^6
Vidro	de 10^{10} a 10^{14}
Borracha	10^{13}

Fonte: Adaptado de MENDES (20XX)

Vários fatores podem modificar o comportamento do material mediante a resistividade elétrica, tornando a resistividade inconstante. Ela pode alterar com a variação da temperatura, umidade relativa do ar e pressão atmosférica.

O efeito do íon de cloreto nos concretos é um assunto discutido na comunidade científica, alguns autores asseguram que o efeito dos íons Cloreto na resistividade elétrica do concreto é insignificante. Prontamente, outros pesquisadores alegam que há uma redução na resistividade elétrica, devido o fato, do concreto ser um material capacitivo, assim pode ocorrer uma redução da resistividade elétrica reduzindo a concentração de íons OH^- na água contida nos poros do concreto. (LENCIONI, 2010).

De acordo com Askeland (2006), a variação na resistividade elétrica, por temperatura e pressão ocorre devido ao aumento ou a diminuição do calor, isto altera a agitação molecular ocasionando variação nas colisões no interior do condutor, podendo aumentar ou diminuir a resistência de passagem de íons pelo material. O ideal para trabalhar com a resistividade é, normalmente, a uma temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$.

A variação da umidade do ar pode mudar a saturação dos poros capilares do concreto. A alteração pode acarretar em variação na medição da resistividade elétrica, considerando que a passagem de corrente pelo concreto depende do

teor de eletrólito contido em seus poros. Logo, quando maior a saturação dos poros, menor será a resistividade elétrica e conseqüentemente aumentando a velocidade da corrosão da armadura do concreto. (ASKELAND, 2006)

Para POLDER (2001), a resistividade elétrica do concreto está relacionada à suscetibilidade para a penetração de cloretos. O autor descreve que no interior de uma estrutura os locais com baixa resistividade elétrica indicam onde os cloretos irão penetrar mais rapidamente. Nas TABELAS 8 e 9 pode-se observar a penetração por íons de cloreto em ensaio de resistividade elétrica.

TABELA 8: Probabilidade de corrosão em função da resistividade elétrica

Resistividade do concreto	Indicação da probabilidade de corrosão
> 200 Ohms.m	Desprezível
100 a 200 Ohms.m	Baixa
50 a 100 Ohms.m	Alta
<50 Ohms.m	Muito alta

Fonte: CEB 192/1989 *apud* Hoppe (2005)

TABELA 9: Risco de corrosão em função da resistividade elétrica

Resistividade do concreto (Ohms.m)	Risco de corrosão
<100	Alto
100 - 500	Moderado
500 - 1000	Médio
> 1000	Desprezível

Fonte: Polder, 2000.

2.4.1. MÉTODO DE ANÁLISE DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA.

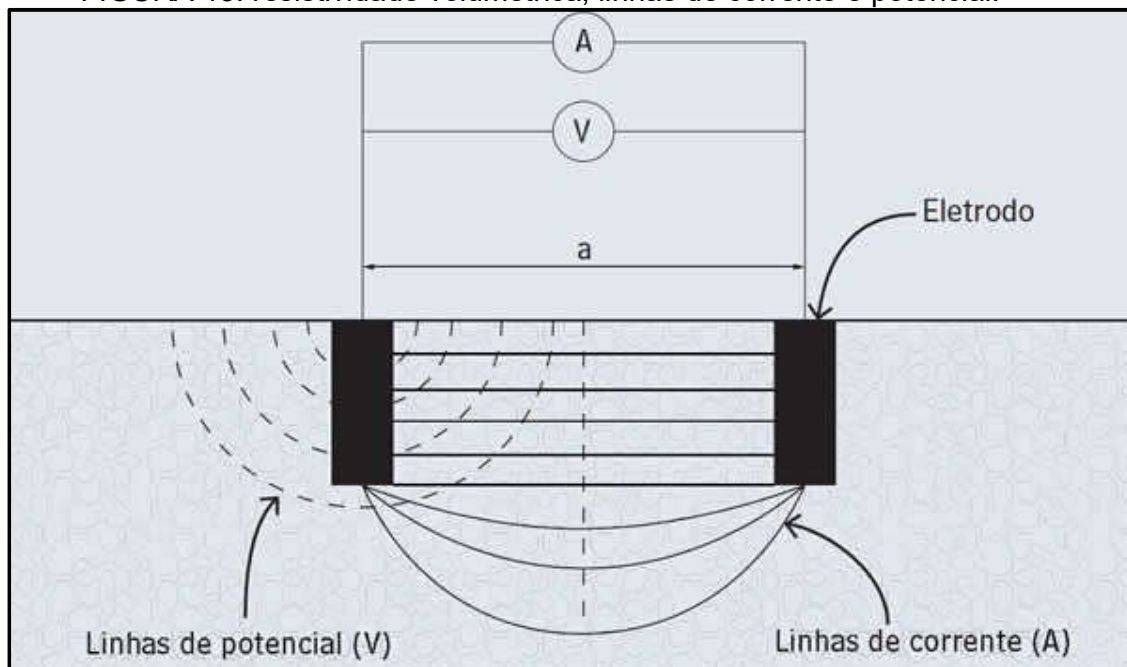
O método de ensaio para análise da resistividade elétrica volumétrica utilizado no Brasil é determinado pela norma da ABNT, NBR 9204:2012 Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. O método utiliza um aparelho composto por:

- 3 elétrodos (sendo 2 blindados e um não blindado);

- um multímetro com tensão contínua de impedância 1 kOhm/V que permita ler uma tensão de 50 V com precisão de $\pm 1\%$;
- uma fonte de alimentação contínua estabilizada de $50\text{ V} \pm 0,5\text{ V}$;
- um miliamperímetro que permita leitura de 0,15 mA a 200 mA com precisão de $\pm 1\%$.

A determinação da resistividade volumétrica utiliza dois eletrodos conectados ao concreto, uma corrente elétrica é aplicada aos eletrodos que cria uma diferença de potencial. Essa diferença de potencial (FIGURA 13) é medida, definindo um valor para a resistência. Para a execução da técnica é necessário um conector entre o corpo de prova e o eletrodo. Esse conector faz a transferência de elétrons do eletrodo para o concreto. O eletrodo possui um espaçamento entre eles de cinquenta centímetros. O aparelho pode-se utilizar uma frequência variável e a voltagem utilizada é de 10 v.

FIGURA 13: resistividade volumétrica, linhas de corrente e potencial.



Fonte: Araújo, 2014

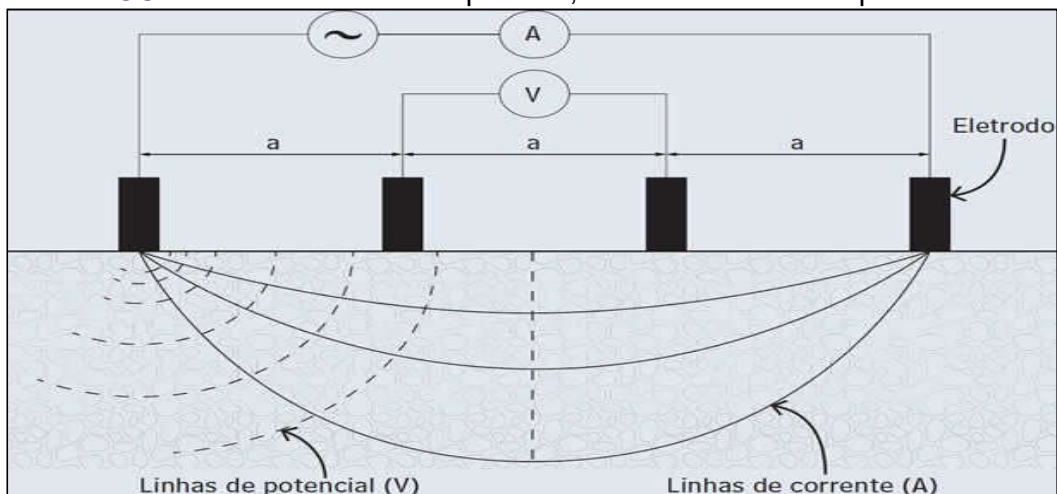
A técnica uniaxial é um método simples, mas confiável para medir a resistividade elétrica em testes de controle de qualidade em laboratório. As mesmas amostras de concreto cilíndricos preparadas para o teste de compressão podem ser utilizadas para a medição da resistividade, e este teste não destrutivo leva

apenas alguns segundos. No entanto, a aplicação do presente método de ensaio para a avaliação é muito limitada, uma vez que requer que as amostras do concreto sejam extraídas a partir da estrutura existente. (MADHAVI, 2016).

2.4.2. MÉTODO DE ANÁLISE DE RESISTIVIDADE SUPERFICIAL.

A técnica de resistividade elétrica superficial do concreto utiliza quatro eletrodos para realizar sua medição, é um método não destrutivo, rápido e simples, devido à sua configuração. Um produto muito utilizado no mundo é a sonda Werner. Esta sonda possui quatro eletrodos dispostos linearmente e equidistantes, uma corrente elétrica (FIGURA 14) é difundida pelo aparelho nos dois eletrodos externos, criando um campo elétrico, ao qual possa realizar a medição da diferença de potencial quando colocada sobre a superfície de um determinado material. (Polder, 2000). Lencioni (2010) explica que a técnica Werner, para parâmetro de medida, deve-se assumir que o material examinado seja homogêneo.

FIGURA 14: resistividade superficial, linhas de corrente e potencial.



Fonte: Araújo, 2014

Com as medidas coletadas o aparelho determina a resistividade elétrica do concreto contido dentro de uma semiesfera de raio igual ao espaçamento entre os eletrodos, centrada no ponto médio entre os dois eletrodos internos. Após esses valores coletado é possível pelas EQUAÇÕES 3 e 4, determinar a resistividade elétrica do concreto.

EQUAÇÃO 3:
$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

EQUAÇÃO 4
$$\rho = 2\pi \cdot R \cdot a$$

Assim tem-se os dados:

- I = corrente elétrica (A)
- R = resistência elétrica (Ω);
- ΔV = diferença de potencial (V);
- a = espaçamento entre os eletrodos (cm);
- ρ = resistividade ($\Omega \cdot \text{cm}$).

Essa técnica é muito difundida em campo, pois o aparelho é de fácil transporte, fácil medição e o valor da resistividade é processado instantaneamente pelo aparelho. Este método é ideal para avaliação “in loco”. A TABELA 10 demonstra valores de resistividade elétrica superficial para tipos de corpos de prova diferentes.

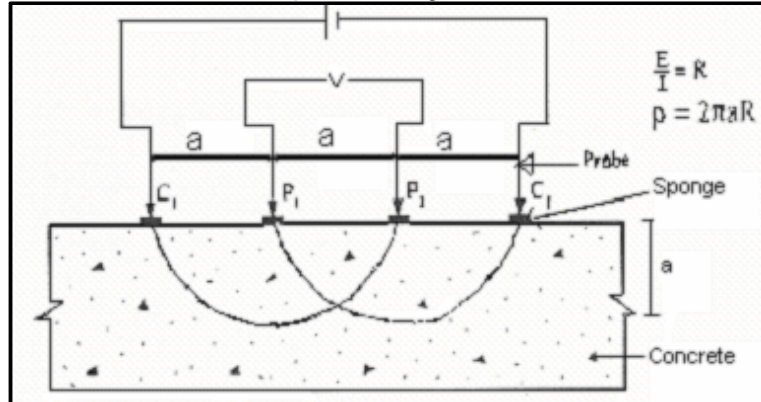
TABELA 10: penetração de cloreto

Cloreto de Íon Penetrabilidade	Teste de resistividade de superfície	
	100 mm X 200 mm (4 pol. X 8 in.) Cilindro (KOhm-cm) a = 1,5	150 mm X 300 mm (6 pol. X 12 pol.) Do cilindro (KOhm-cm) a = 1,5
Alto	<12	<9.5
Moderado	12-21	9,5-16,5
Baixo	21 - 37	16,5-29
Muito Baixa	37-254	29-199
Desprezível	> 254	> 199

Fonte: AASHTO T XXX-08, 2014.

Porém, é de suma importância adequar a superfície do concreto a ser analisado, é importante realizar a medição com a superfície do concreto umedecida (FIGURA 15), podendo ser após chuvas ou simplesmente molhar a superfície para a realização do ensaio.

FIGURA 15: Circuito para medições resistividade elétrica



Fonte: SONG (2007).

Vários fatores influenciam a medição de resistividade quando a técnica de quatro sondas é usada. Esses fatores incluem: (POLDER 2001).

- Restrições geométricas;
- contato superficial, não homogeneidade de concreto;
- a presença de barras de aço de reforço;
- as camadas superficiais tendo resistividade diferente da massa do concreto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no laboratório Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Corpos de prova de concreto de diferentes naturezas submetidos a cura ambiente e úmida foram caracterizados quanto a resistência mecânica e módulo de elasticidade, e em seguida avaliados quanto a resistividade elétrica pelos métodos superficial e volumétrica.

3.1. MATERIAIS

Foram utilizados corpos de prova de dimensões 10X20 cm estabelecidas na norma da ABNT, NBR 9204, confeccionados no laboratório de Construção Civil da UFMG. Foram utilizados corpos de provas submetidos à cura a temperatura ambiente e em ambiente saturado de forma a se obter resultados mais próximos dos corpos de prova feitos “in loco”, logo trabalhando num pior cenário. Após a confecção dos corpos de prova eles foram submetidos a exames periódicos nos dias três, sete, quatorze, vinte e um, vinte e oito, trinta e cinco, setenta e cem dias.

Foram realizados ensaios variando o tipo cimento, utilizou-se o CP II, CP III, CP IV e CP V, com o traço massa de 1:2:2 e relação água cimento 0,6 para todos os tipos de cimento. A areia média e a brita zero foram adquiridos pelo mesmo fabricante, ambos foram lavados para evitar uma maior contaminação do experimento, principalmente a brita que poderia ter um excesso de pó de brita. A água utilizada foi a fornecida pela COPASA, fornecedora de água para as residências do município de Belo Horizonte. Foi realizada uma etapa de ensaios preliminares com intuito de estabelecer parâmetros, organizar os ensaios e aferir os equipamentos.

3.2. MÉTODOS

A metodologia adotada nesta pesquisa está descrita na Figura 16. Os ensaios preliminares constaram de experimentos em vinte e cinco (cinco para cada data de três, sete, quatorze, vinte e um e vinte e oito dias) corpos de prova, além de cinco corpos de provas para medição constante da resistividade elétrica. Estes corpos de prova foram confeccionados à mão dentro do laboratório de Caracterização de Materiais (não garantindo muita homogeneidade). Os corpos

de prova foram pesados e medidos os módulos de elasticidade pelo método de medição de frequência ressonante. Após a medição foram submergidos os corpos de prova por duas horas e depois medida a sua resistividade elétrica superficial e volumétrica. Por fim, os corpos de prova foram testados a resistência mecânica a compressão.

Os ensaios foram divididos em quatro partes: Parte um CPV, parte dois CPIV, parte três CPIII e a quarta parte corpos de provas genéricos sem proveniência. Cada parte (três iniciais) possui as mesmas condições, diferenciando apenas o tipo de cimento usado. Os ensaios seguiram a mesma orientação dos ensaios preliminares, utilizando a medição da massa do corpo de prova, do módulo de elasticidade, submersão em água por duas horas, coleta dos valores de resistividade elétrica superficial e volumétrica e por fim teste de resistência mecânica a compressão.

FIGURA 16: Fluxograma do projeto de pesquisa



Fonte: Autor 2017.

Porém, foi utilizada uma maior variação na quantidade de corpos de prova e quantidade de dias com relação ao ensaio preliminar. Foram analisados aos dias três, sete, quatorze, vinte e um, vinte e oito, trinta e cinco, setenta e cem dias, para ter uma determinação melhor dos dados a um maior espaço de tempo. Os corpos de prova foram confeccionados em betoneira, para ter uma maior homogeneidade, ao todo somam trinta e nove corpos de prova por tipo de cimento, divididos em quinze corpos de prova controle que serão submetidos a cada idade de teste e ao final de cem dias ao teste de compressão, e três corpos que por semana serão submetidos a todos os ensaios. Por último, foi analisado cinquenta corpos de provas de origem desconhecida que serão submetidos a todos os experimentos acima citado. Na figura 16, demonstra o fluxograma dos experimentos da Dissertação. Segue abaixo as tabelas com o cronograma de ensaios:

TABELA 11: ensaio preliminar.

Ensaio Preliminar	Cimento	CPII	Areia	Média
	Traço	01:02:02	Brita	Zero
	a/c	0,6	Concretagem	05/ago
Data	Numero de dias	Resistividade	Módulo	Compressão
08/ago	3 dias	5	5	5
12/ago	7 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	5
19/ago	14 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	5
26/ago	21 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	5
03/set	28 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	5
30	Total	5	-	25

Fonte: Autor 2017.

TABELA 12: ensaio um CPV.

Ensaio 1	Cimento	CPV	Areia	Média
	Traço	01:02:02	Brita	Zero
	a/c	0,6	Concretagem	04/nov
Data	Numero de dias	Resistividade	Módulo	Compressão
07/nov	3 dias	15	15	3
11/nov	7 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
18/nov	14 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
25/nov	21 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
02/dez	28 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
09/dez	35 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
06/jan	70 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
13/fev	100 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
39	Total	15	-	24

Fonte: Autor 2017.

TABELA 13: ensaio dois CPIV

Ensaio 2	Cimento	CPIV	Areia	Média
	Traço	01:02:02	Brita	Zero
	a/c	0,6	Concretagem	02/mar
Data	Numero de dias	Resistividade	Módulo	Compressão
05/mar	3 dias	15	15	3
09/mar	7 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
16/mar	14 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
23/mar	21 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
30/mar	28 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
06/abr	35 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
11/mai	70 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
10/jun	100 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
39	Total	15	-	24

Fonte: Autor 2017.

TABELA 14: ensaio três CPIII

Ensaio 3	Cimento	CPIII	Areia	Média
	Traço	01:02:02	Brita	Zero
	a/c	0,6	Concretagem	03/mar
Data	Numero de dias	Resistividade	Módulo	Compressão
06/mar	3 dias	15	15	3
10/mar	7 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
17/mar	14 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
24/mar	21 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
31/mar	28 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
07/abr	35 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
12/mai	70 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
11/jun	100 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	3
39	Total	15	-	24

Fonte: Autor 2017.

TABELA 15: Ensaio quatro - corpos de prova variados

Ensaio 4	Cimento	desconhecido	Areia	desconhecido
	Traço	desconhecido	Brita	desconhecido
	a/c	desconhecido	Concretagem	desconhecido
Data	Numero de dias	Resistividade	Módulo	Compressão
14/abr	3 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	20
21/abr	7 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	15
28/abr	14 dias	Não destrutivo	Não destrutivo	15
50	Total	-	-	50

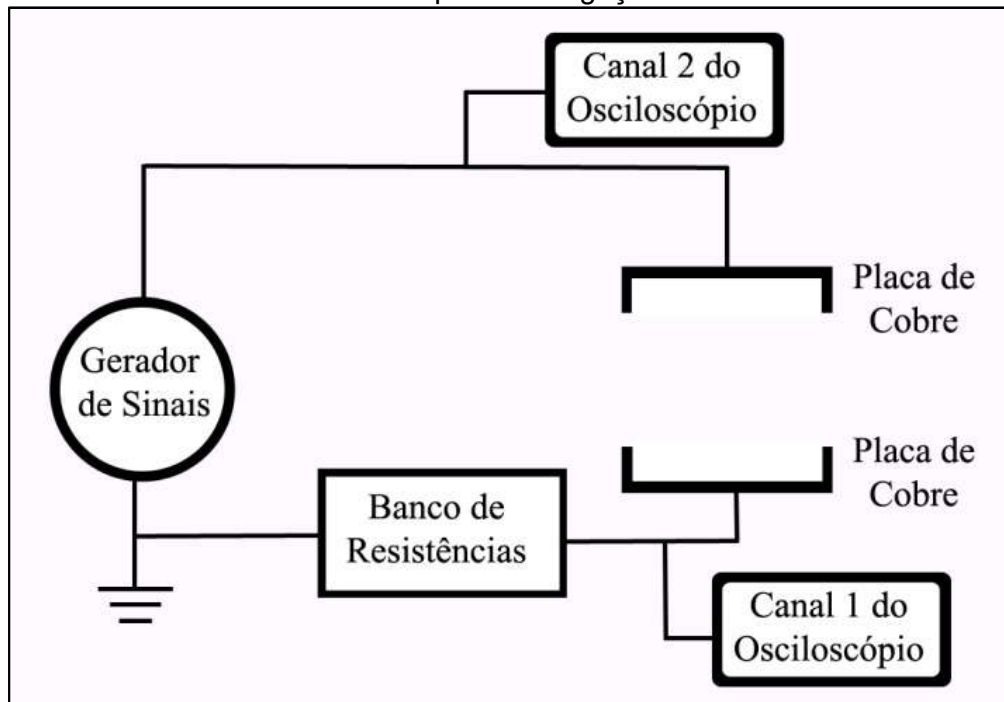
Fonte: Autor 2017.

3.2.1. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

APARELHO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA VOLUMÉTRICA

Foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais um aparelho para medição da resistividade elétrica volumétrica. Diversas configurações foram desenvolvidas com o objetivo de configurar (ou transformar) o concreto em um circuito elétrico para que seja possível realizar medições mais precisas da sua impedância. Usualmente, utiliza-se para conexão do concreto ao circuito, eletrodos metálicos. O sinal elétrico emitido pelo sistema é normalmente estabelecido com o auxílio de um circuito equivalente que representa, aproximadamente, as propriedades elétricas do concreto e a interface eletrodo-concreto.

FIGURA 17: Esquema de ligação do circuito



Fonte: LAGE, 2017.

Para este estudo foi escolhido o método uniaxial, no qual o corpo de prova do concreto é colocado entre dois eletrodos que neste caso utilizou-se duas placas quadradas de cobre de espessura igual a 2mm e arestas de 100 mm. Visando uma melhor conexão elétrica entre as placas de cobre e o corpo de prova foram adicionados contatos esponjosos de aço húmidos nas interfaces. Uma corrente alternada foi aplicada utilizando a frequência de aproximadamente 40 Hz e foram

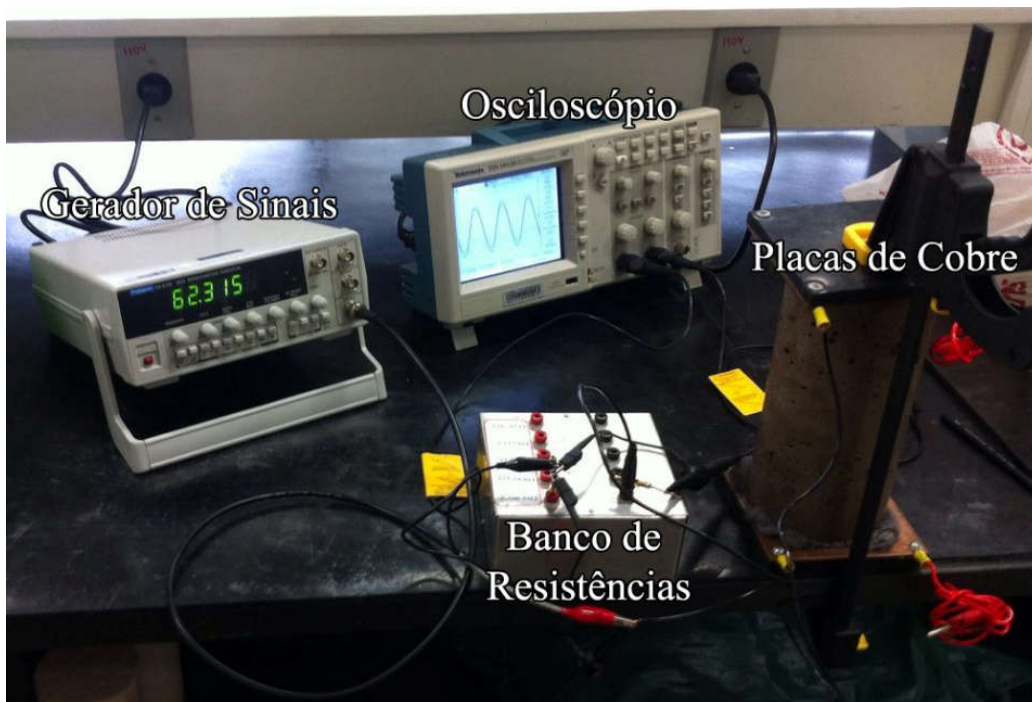
avaliadas e medidas as quedas dos potenciais entre os eletrodos. O esquema elétrico simplificado foi feito antes para facilitar a montagem, conforme a FIGURA 17.

Para montagem do sistema foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um Gerador de Sinais da Politem de modelo FG-8102;
- um Banco de Resistências, com Resistências elétricas calibradas;
- um Osciloscópio da Tektronix TDS 1012B;
- duas placas de cobre, para realizar o contato com o concreto.

O sistema de medição de resistividade foi montado conforme a ligação do circuito mostrado na FIGURA 18.

FIGURA 18: Montagem do Medidor de Resistência



Fonte: Autor, 2017

Pela EQUAÇÃO 5 consegue calcular a resistividade do concreto que utiliza a parte real da impedância.

EQUAÇÃO 5

$$\rho_{\text{Concreto}} = \frac{\text{Área}}{\text{Comprimento}} Z_{\text{Real Concreto}} \Omega\text{m}$$

Resipod – Medidor de resistividade elétrica Werner

O modelo de Resipod (FIGURA 19) medidor de resistividade elétrica do concreto, criado pela empresa Proceq, é projetado especificamente calcular a resistividade elétrica do concreto em um teste inteiramente não destrutivo. Este dispositivo é instrumento preciso, configurado no projeto para ser impermeável, e assegura a estabilidade e rapidez na medição. Pode ser usado para trabalhar em no campo de obra ou laboratório.

FIGURA 19: Medidor de resistividade elétrica



Fonte: Autor, 2017

Prensa hidráulica – Emic

A prensa hidráulica (FIGURA 20) é um dispositivo utilizado para a elevação de cargas para testes de resistência dos concretos. O modelo teórico cujo funcionamento se baseia nas Leis de Pascal sobre transmissão de pressões em fluidos, relacionando a pressão hidrostática, o peso específico do fluido, a aceleração da gravidade e a diferença de alturas das colunas de fluido.

FIGURA 20: Prensa hidráulica



Fonte: Autor, 2017

Modulo de elasticidade por frequência ressonante

A frequência ressonante foi determinada no equipamento Erudite MKII da C.N.S. Eletronics LTD (FIGURA 21), o equipamento foi desenvolvido para a caracterização não-destrutiva dos módulos elásticos utilizando a norma ASTM E 1875-00. O equipamento obtém, via espectroscopia de ressonância sônica, as frequências naturais de vibração do corpo de prova.

FIGURA 21: Equipamento de módulo de elasticidade



Fonte: Autor, 2017

Balança de precisão

A balança de precisão KNWaggen (FIGURA 22) é ideal para o em laboratórios devido ao exigente controle no processo de pesagem. Sua capacidade é de 15 kg, elas são fabricadas com um rigoroso controle de qualidade assegurado pela norma ISO 9001, testado e certificado por laboratórios internos RBC sob a norma ISO/IEC 17025 e atende as normas GMP e GLP.

FIGURA 22: Balança de precisão



Fonte: Autor, 2017

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. VARIÁVEIS QUE AFETAM A RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Diversas pesquisas vêm desenvolvendo tratamentos e soluções para a corrosão das armaduras do concreto, isto ocorre devido à necessidade econômica e para evitar danos gerados por este processo à estrutura armada. A pesquisa pela durabilidade, então, torna-se estimulada buscando desenvolver propostas de avaliação da corrosão com intuito de estender a duração da vida útil de estruturas de concreto. (SANTOS, 2006).

Atualmente o método de ensaio de resistividade elétrica utilizado é determinado pela norma da ABNT 9204:2012 Concreto endurecido – Determinação da resistividade elétrica-volumétrica – Método de ensaio. Porém, como o aparelho utilizado não é igual ao da norma, precisou-se ensaiar alguns parâmetros antes de desenvolver os ensaios.

4.1.1. CONTATO

O contato entre o corpo de prova e o eletrodo para a medição é de suma importância para a análise. A perda de carga que sofre o material utilizado pelo contato pode ser relevante no cálculo da resistividade elétrica. A norma da ABNT NBR 920:2012 utiliza como contato entre o eletrodo e a superfície do corpo de prova o mercúrio, este possui uma baixa resistividade elétrica por ser um metal e um ótimo contato por ser um material líquido. Porém, o mercúrio é um material tóxico e não deve ser usado por muito tempo. Polder (2000) utiliza como condutor eletrolítico uma esponja molhada.

Assim optou-se por outros materiais para realizar estes experimentos. Testaram-se alguns materiais na tentativa de determinar um que tenha pouca perda de carga, assim obtendo um baixo valor de resistividade. Para isso, utilizou um gel clínico condutor, pó de grafite, lã de aço e combinações entre eles como demonstrado a baixo:

- RMC gel clínico;
- RMC gel clínico e pó de grafite;
- lã de aço molhado;
- lã de aço seco;

- lã de aço + RMC gel clínico.

Nas mesmas condições de temperatura, umidade do ar e tempo de saturação foram obtidos os resultados demonstrado na Tabela 16:

Tabela 16: resultados de materiais para contato entre eletrodo e corpo de prova

Material de contato	Resistividade (Ohm.m)
RMC gel clínico	82,44
RMC gel clínico e pó de grafite	81,84
lã de aço molhado	81,32
lã de aço seco	79,6
Lã de aço + RMC gel clínico	81,59
Lã de aço +água salobra	70,41

Fonte: Autor 2017.

O Gel clínico RMC é um gel condutor Incolor tem como finalidade auxiliar na condução da corrente elétrica em todo e qualquer aparelho que necessite de um meio de contato. Porém, em testes realizados não obteve um bom resultado, apesar da diferença entre ele e a lã de aço não passar de 4,5%.

A lã de aço obteve um bom resultado tanto ela seca, com a água de uma distribuidora local e água salobra. Houve uma grande diferença entre a lã de aço com água salobra e lã de aço seco/molhado. Porém a água salobra é um agente agressivo a amostra e deve ser descartado. Assim a melhor hipótese para a medição é a lã de aço.

4.1.2. SATURAÇÃO, RELAÇÃO CÂMARA ÚMIDA E SUBMERSO

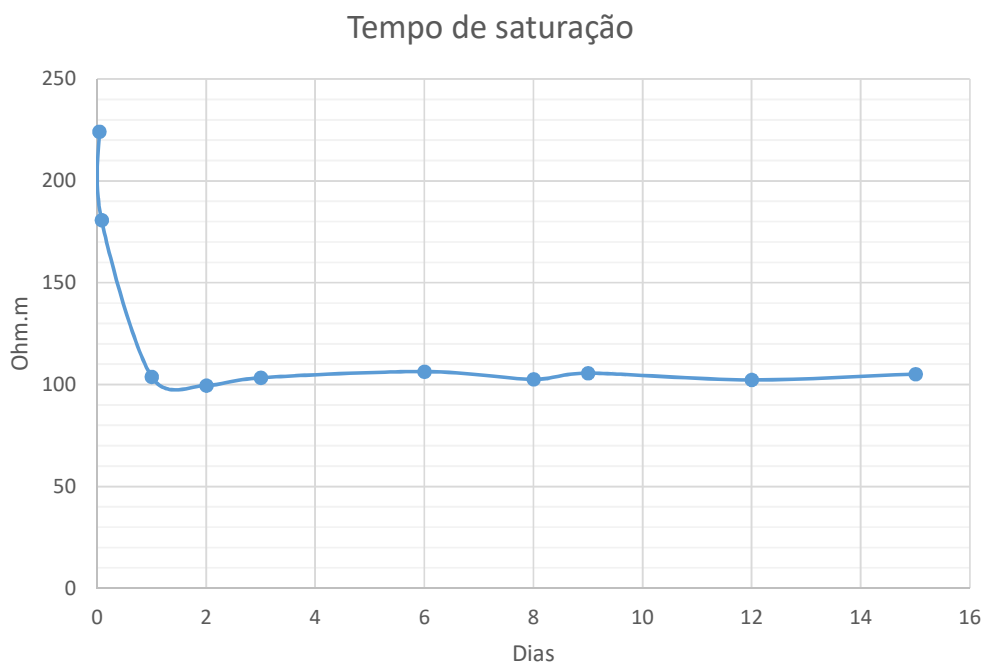
A saturação dos corpos de prova pode varias de acordo coma as condições atmosféricas, isto ocorre devido à corrente elétrica utilizar o teor eletrolítico nos poros para fazer a sua trajetória pelo material. Assim as alterações na umidade dos poros gera uma grande variação na resistividade elétrica, tornando assim a umidade relativa um parâmetro decisivo para o grau de saturação dos poros, conseqüentemente para se determinar a resistividade elétrica do concreto. (LENCIONI, 2010).

A variação da umidade do ar pode afetar a saturação dos poros capilares do concreto. Isto pode acarretar em variação na medição da resistividade elétrica,

considerando que a passagem da corrente pelo concreto depende do teor de eletrólito contido em seus poros. Logo, quando maior a saturação dos poros, menor será a resistividade elétrica, e conseqüentemente, aumentando a velocidade da corrosão da armadura do concreto armado. (Askeland, 2006)

O Teor de umidade do corpo de prova pode variar sua resistividade conforme as condições atmosféricas do ambiente ao qual se encontra. A saturação (FIGURA 23) para exames laboratoriais se torna muito importante, pois assim obtém-se uma variável constante no experimento. De acordo com a norma da ABNT 9204/2012 a condição climática é aproximadamente 60% de umidade do ar. Então, quanto mais saturado os poros dos corpos de prova, menor será a resistividade elétrica.

Figura 23: Gráfico do tempo de saturação do corpo de prova em dias.



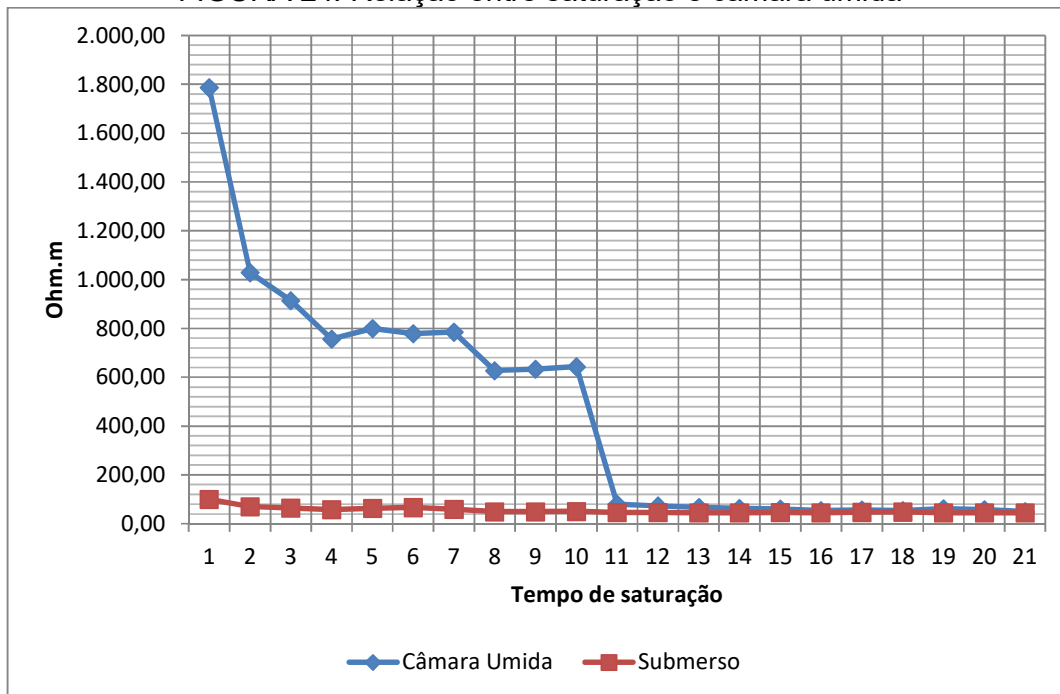
Fonte: Autor 2017.

Na norma da ABNT NBR 9204/2012 a saturação deve ser feita com 48 horas em câmara úmida. Porém, as pesquisas realizadas no laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais obtiveram o mesmo tempo de saturação do corpo de prova (48 horas), conforme Figura 3. Mas as

condições de ensaios foram com os corpos de prova submersos. A água utilizada para o experimento foi da companhia de distribuição local (COPASA).

Foi analisada a relação de saturação entre a câmara úmida e a submersão (FIGURA 24). Após os ensaios foi decidido a utilização da saturação por submersão devido à saturação ser mais rápida, ocorrendo nas primeiras horas de ensaio. Apesar de igualar-se à saturação entre os métodos em onze horas.

FIGURA 24: Relação entre saturação e câmara úmida



Fonte: Autor (2017)

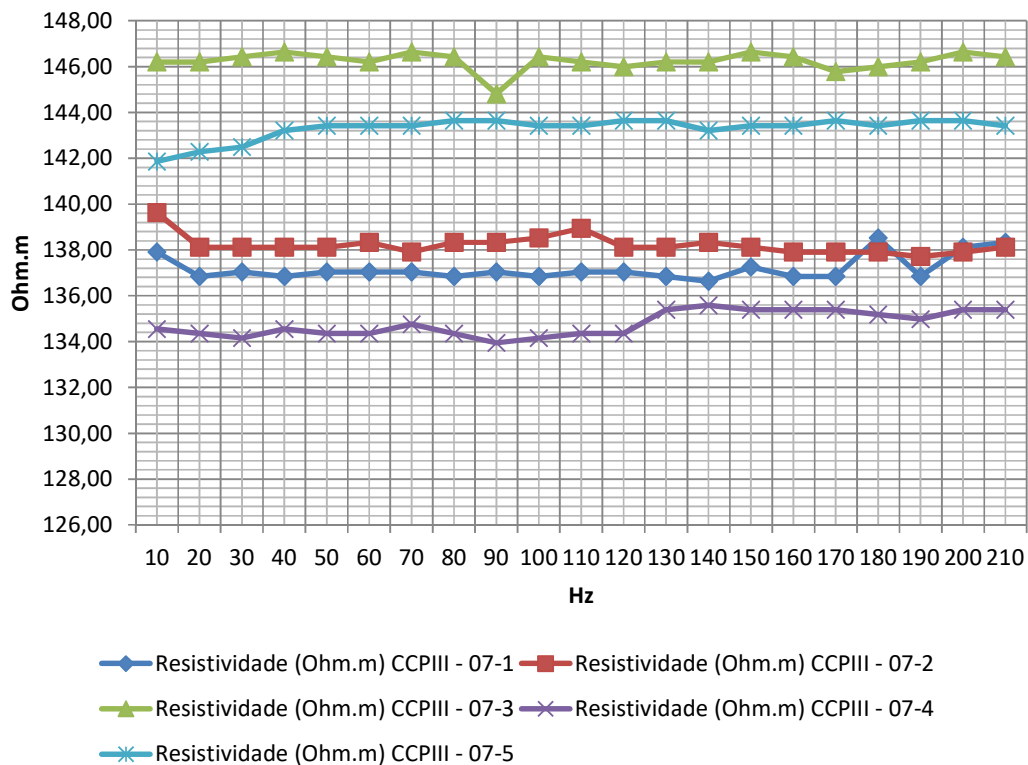
4.1.3. FREQUÊNCIA DA FONTE

De acordo com Layssi (2015), no método uniaxial a frequência utilizada pode variar de 0,5 Hz a 10 kHz. Mas não se pode determinar uma frequência ideal, uma vez que varia com proporções da mistura e condições de umidade. O uso de um sinal de baixa frequência, em torno de 40 Hz, pode aumentar a resistividade medida em até 9% em comparação com um sinal de kHz.

Para ensaios que utilizam corrente alternada, a frequência de teste não é especificada em um valor exato, para o método de dois e quatro eletrodos, é geralmente sugerida a faixa entre 40 Hz a 1kHz (LAYSSI, Hamed et al.2015) ou a faixa de 50 Hz a 1kHz (POLDER, R. et al. 2000).

Foi realizado um ensaio para determinar a invariabilidade da frequência no ensaio de resistividade elétrica volumétrica no aparelho desenvolvido na UFMG (FIGURA 25). No gráfico pode-se observar que a frequência variou de 10 Hz até 210 Hz (limite do osciloscópio), essa variação observa-se uma estabilidade nos cinco corpos de prova testados. Mostrando que a frequência, nestes valores, não interfere a medição de resistividade elétrica do aparelho, pode-se demonstrar a importância do gráfico abaixo, comparando com a tabela 8, que a frequência até 210 Hz não influencia no teste de resistividade elétrica do concreto .

Figura 25: Gráfico de variação de frequência no ensaio de resistividade elétrica volumétrica



Fonte: Autor 2017.

O aparelho utilizado da UFMG para a medição da resistividade utilizou-se a frequência de 40 Hz, devido o equipamento da Proceq, Resipod, utilizar também, de acordo com seu manual de instrução, a frequência de 40 Hz. A ideia de trabalhar com a mesma frequência facilita a interação entre a resistividade volumétrica e superficial e não utilizar mais uma variável nos experimentos.

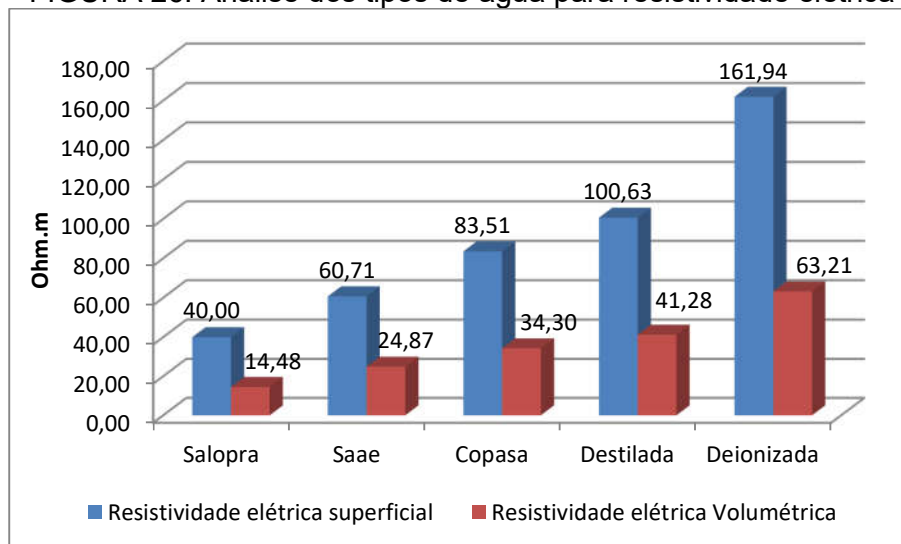
4.1.4. TIPOS DE ÁGUA

Um fator importante para a medição da resistividade elétrica do concreto é o tipo de água a ser utilizado para a saturação. Foram testados em laboratório alguns tipos de água analisando o valor da resistividade no mesmo corpo de prova. Utilizou-se a água destilada que é um isolante muito eficiente, pois possui alta resistividade. A água deionizada que não conduz corrente, pois não é formada por íons passíveis de conduzir corrente. A água de duas distribuidoras de água para cidade de duas localidades diferentes e por último a água salobra.

Os resultados, como demonstra a FIGURA 26, esboçam a influência da água na leitura do ensaio de resistividade elétrica. A água que menos influenciou foi a água deionizada, sequenciada pela destilada, a distribuidora COPASA do município de Belo Horizonte, depois a distribuidora SAAE da cidade de Itabira e por último a água salobra.

Porém foi escolhido para realização dos ensaios a água da distribuidora do município de Belo Horizonte COPASA, devido ser a abundancia com menor influência.

FIGURA 26: Análise dos tipos de água para resistividade elétrica



Fonte: Autor (2017)

4.2. ESTUDO DA CORRELAÇÃO

4.2.1. CONDIÇÕES DE ENSAIO

Foram medidas as dimensões dos corpos de prova como diâmetro, largura, área e volume. Esta medição é baseada no formato da forma do corpo de prova, logo os CP's podem ter uma pequena variação, porém insignificante, em relação aos dados coletados. Na tabela 19 mostra os dados dos corpos de prova testados.

TABELA 17: Dados dos corpos de prova.

Dados do Corpo de Prova	
Diâmetro (m)	0,1
Largura (m)	0,2
Área (m ²)	0,0079
Volume kg/m ³	0,0016

Fonte: Autor (2016)

Durante os experimentos foram medidos fatores importantes para o trabalho, como a temperatura do ambiente, umidade do ar e o tempo de submersão das amostras. Na TABELA 18 têm-se dados os registrados dos fatores, estes dados influem diretamente como demonstrado na revisão bibliográfica.

No ensaio preliminar (TABELA 18) foi utilizada uma submersão de 30 minutos, porém em ensaios de saturação posteriores (FIGURA 23), como empiricamente neste ensaio, demonstrou que a não saturação completa nas amostras e a diferença do estado de submersão atual para a saturação é muito distante.

A temperatura do ensaio preliminar adequa ao exigido por norma NBR 9204/2012 que determina que a temperatura deva estar entre $24 \pm 4^\circ \text{C}$. Porém a umidade do ar não atinge os valores exigidos por norma que é de aproximadamente 60% nos dias 21 e 28. Há estudos que possibilitam a correção dos dados para fazer uma correção devido a temperatura e umidade não estarem no determinado por norma. Porém, não será realizado este cálculo devido ao trabalho demonstrar a relação dos métodos em condições de uso laboratoriais e de campo. Muitas vezes em campo não se tem capacidade de determinar fatores como umidade do ar e saturação da amostra

TABELA 18: Condições de ensaios

Datas (dias)	Temperatura (°C)	Umidade do ar (%)	Tempo de submersão
Ensaio preliminar - CPII			
3	24,4	63	30 min.
7	24,0	62	30 min.
14	25,1	59	30 min.
21	26,6	53	30 min.
28	25,3	51	30 min.
Ensaio CPIII			
3	22,8	55	2 horas
21	24,6	52	2 horas
28	23,3	56	2 horas
35	24,1	52	2 horas
70	21,7	54	2 horas
100	19,2	49	2 horas
Ensaio CPIV			
3	26,4	52	2 horas
7	26,5	51	2 horas
70	21,6	63	2 horas
100	22,4	59	2 horas
Ensaio CPV			
3	22,7	62	2 horas
14	25,1	67	2 horas
28	22,0	59	2 horas
35	24,0	62	2 horas
70	24,4	63	2 horas
100	27,3	56	2 horas
Ensaio CP Variados			
7	24,0	53	2 horas
14	23,8	53	2 horas
21	24,8	56	2 horas
28	24,1	54	2 horas
35	22,8	57	2 horas
100	23,6	52	2 horas

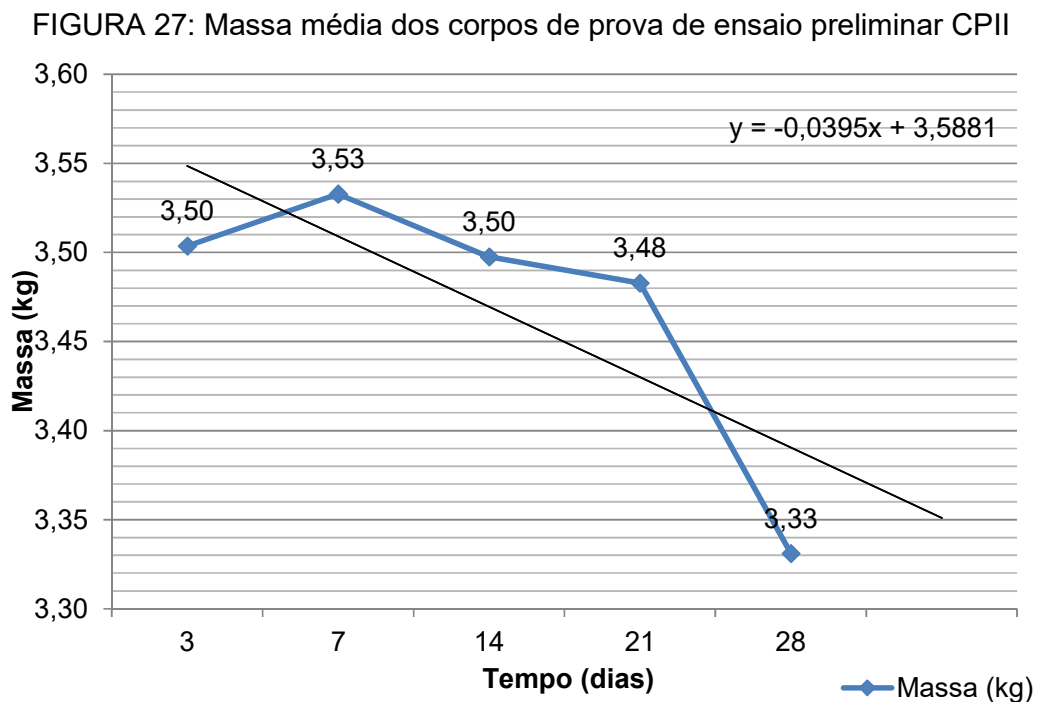
Fonte: Autor (2016)

.Nos ensaios sequenciais ao preliminar a submersão da amostra foi feito em duas horas, durante o ensaio de saturação observou-se que a diferença aproximada de 40 % entre o estado saturado da amostra que é de 48 horas. Isto ocorreu para viabiliza o ensaio do grupo controle. A temperatura do ar dos ensaios, em sua maioria, encontra-se dentro do padrão exigido por norma.

Entretanto 52% da umidade do ar encontra-se em desconformidade a normatização exigida pela NBR 9204/2012.

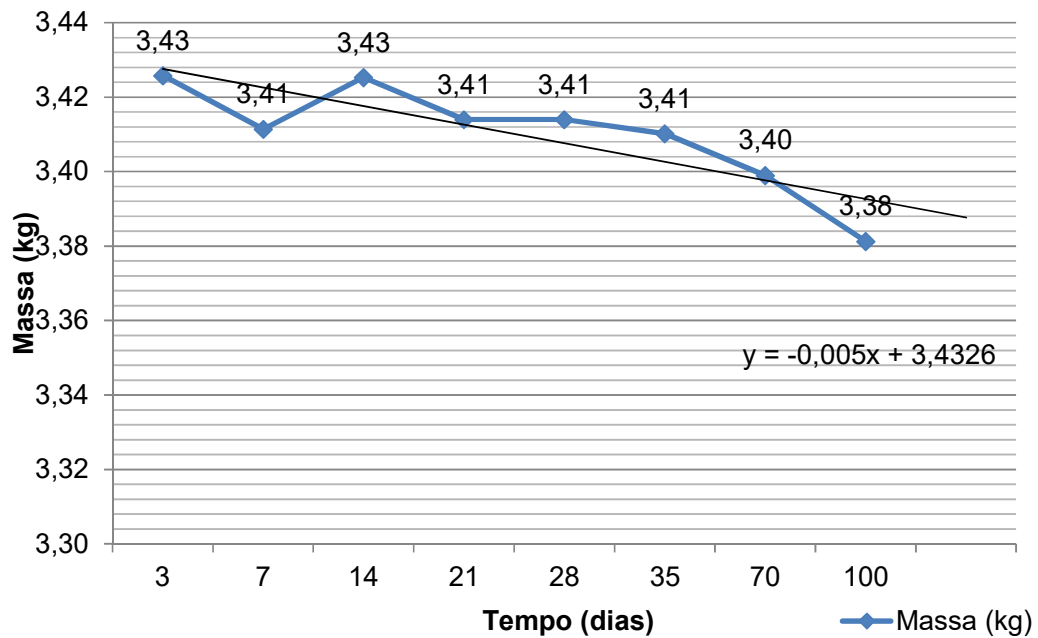
4.2.2. MASSA DOS CORPOS DE PROVA

A medida da massa média dos corpos de prova é importante para definir o módulo de elasticidade por frequência ressoante do material. Os valores médios da massa dos corpos de prova dos ensaios estão nos gráficos das FIGURAS 27 a 31. O valor da massa, normalmente, é um decaimento contínuo há uma perda de massa relativamente alta nos primeiros dias de secagem. Porém, nos ensaios realizados em nenhum ensaio de tipo de cimento houve o decaimento contínuo, como observados nas figuras. Isso leva ao questionamento e estudos sobre a perda de massa durante a cura do concreto.



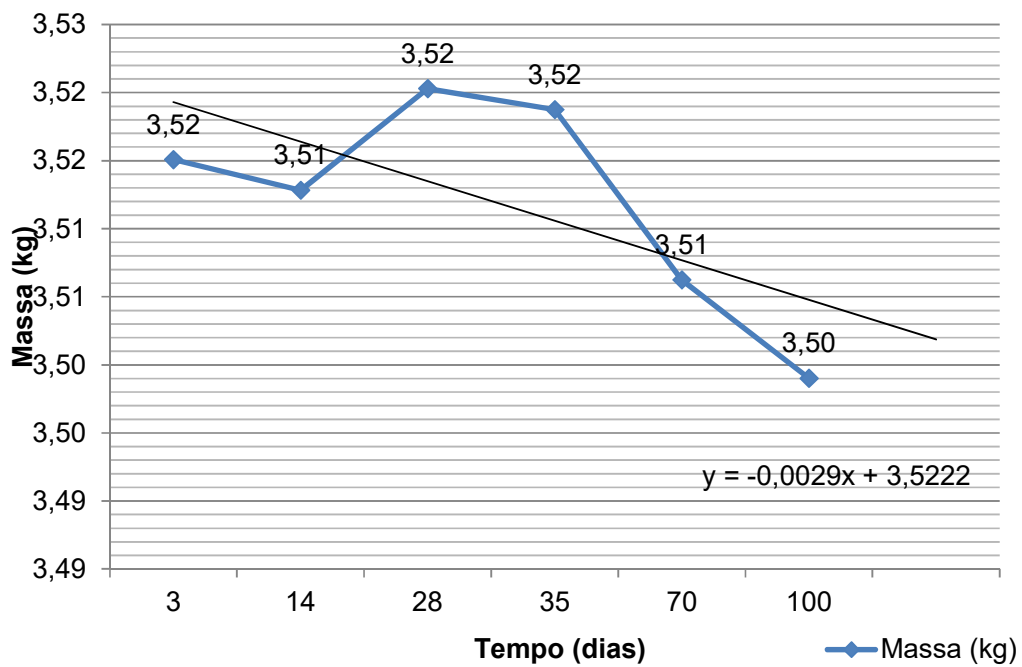
Fonte: Autor (2017)

FIGURA 28: Massa média dos corpos de prova de CPIII



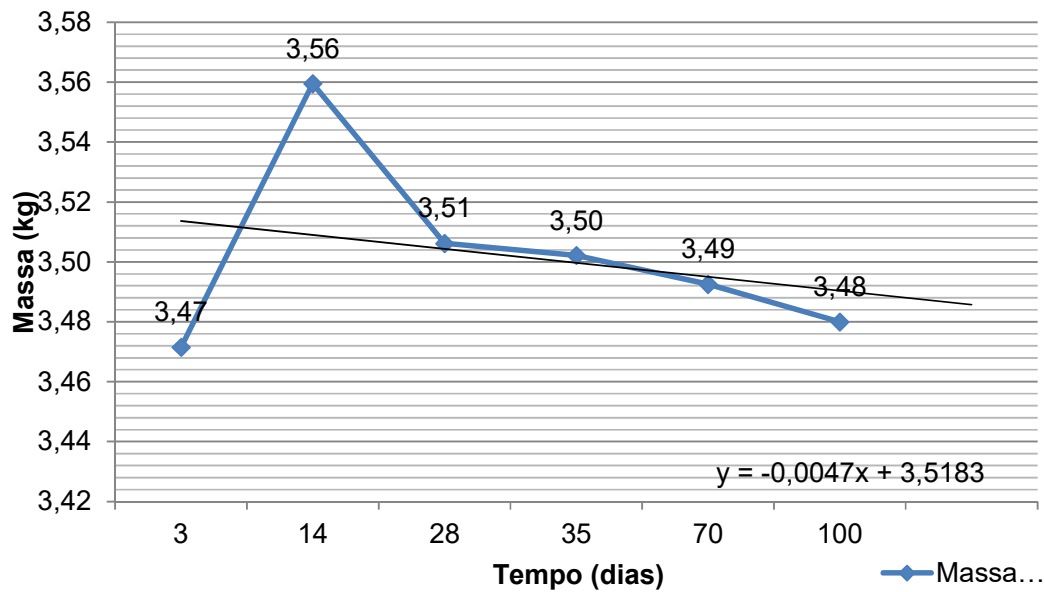
Fonte: Autor (2017)

FIGURA 29: Massa média dos corpos de prova de CPIV



Fonte: Autor (2017)

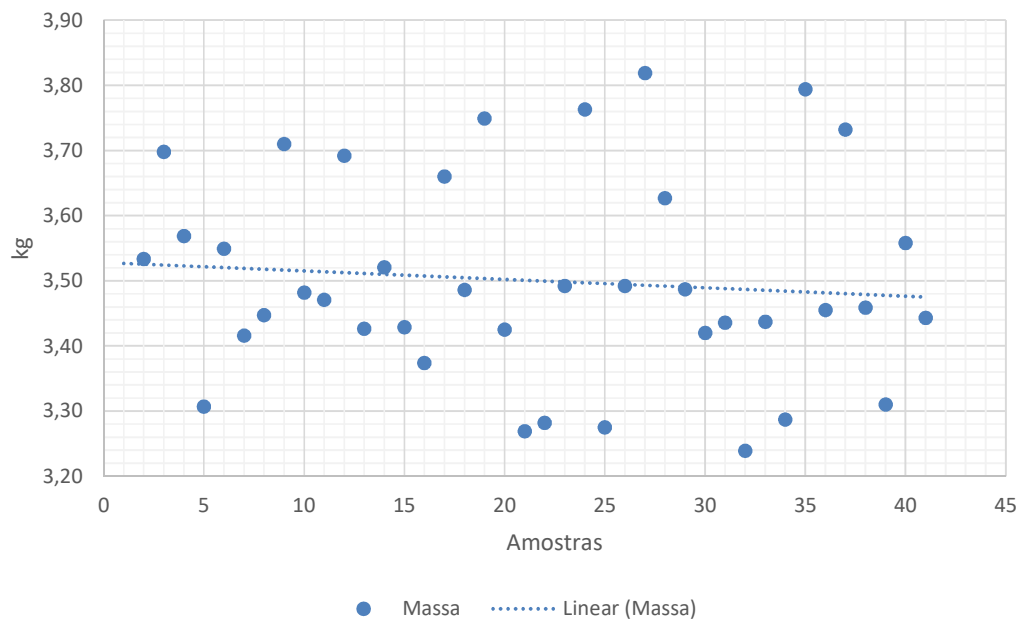
FIGURA 30: Massa média dos corpos de prova de CPV



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 31 é um gráfico amostral das massas dos CP's utilizados no ensaio de corpos de prova variados. A figura demonstra valores para poder fazer o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico feito por frequência ressonante forçada.

FIGURA 31: Massa dos corpos de prova de CP variados



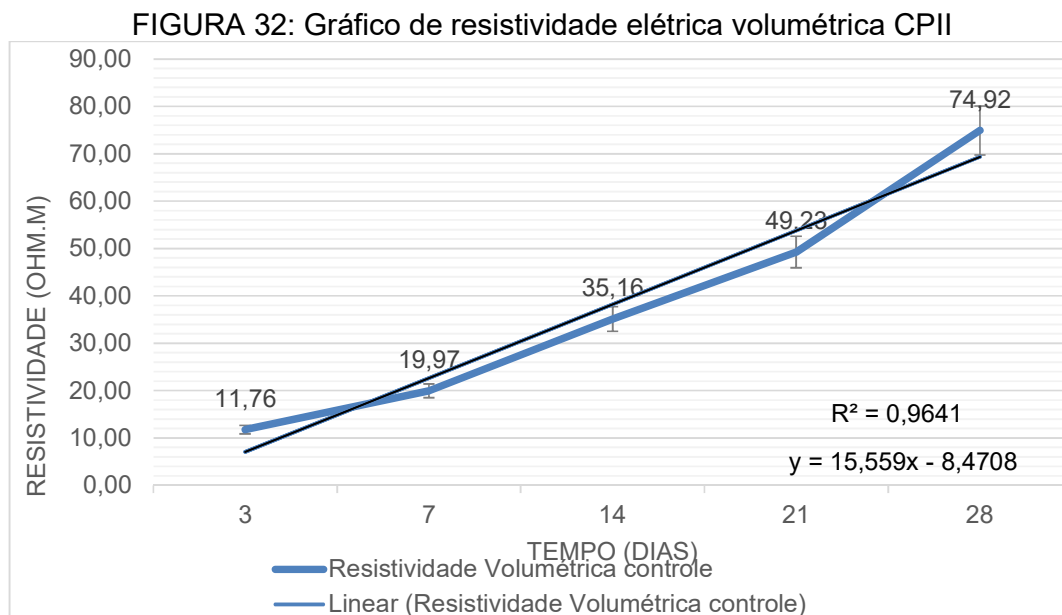
Fonte: Autor (2017)

4.2.3. ENSAIO PRELIMINAR CPII

Os ensaios preliminares tiveram por objetivo o desenvolvimento de competências relativas à atuação no controle das técnicas dos equipamentos, realizando ensaios nos corpos de prova, seguindo normas e procedimentos técnicos e de qualidade para aprimorar a manuseabilidade e o entendimento do experimento. Não foram realizados os ensaios de resistividade superficial nos dias três, sete e quatorze. E os dados do módulo de elasticidade nos dias três e sete foram comprometidos no entendimento do equipamento. Foram feitos ensaios preliminares em duas baterias, uma bateria de ensaios destrutivos nomeados grupo compressão e uma bateria de ensaio não destrutivos nomeados grupo controle.

Grupo controle

O grupo controle visa observar a evolução das amostras durante o período de tempo estudado. A FIGURA 32 demonstra a evolução da resistividade elétrica volumétrica do cimento Portland II. O valor aos três dias é de 11,76 Ohm.m e o valor final aos 28 dias é de 74,92 Ohm.m, obtendo uma variação de 630% de aumento entre as datas.

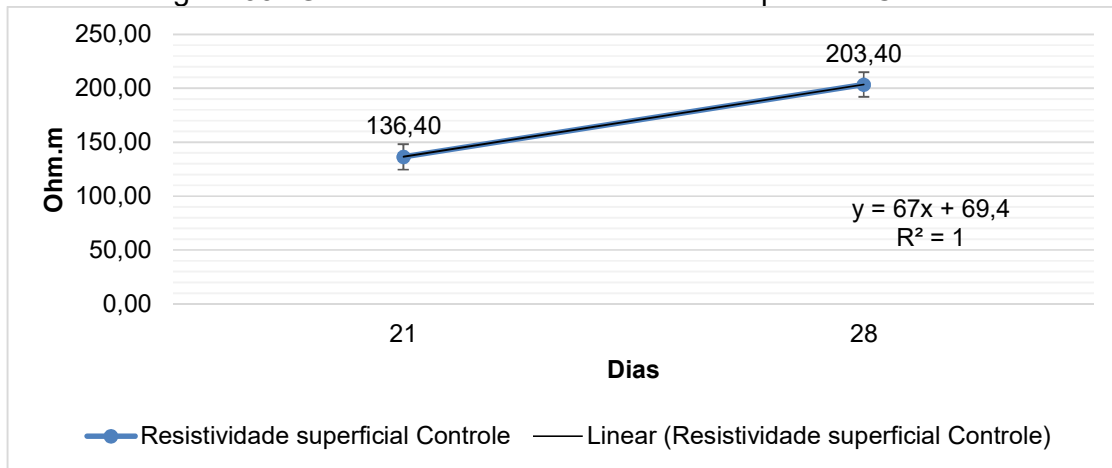


Fonte: Autor (2017)

O ensaio da resistividade elétrica superficial no CPII (FIGURA 33), não foi possível realizar nas idades iniciais devido problemas no aparelho. Porém foi

medido o valor nos dias 21 e 28 da data de confecção da amostra. Os valores obtidos as 136,4 e 203,4 Ohm.m com uma taxa de crescimento de 149%, o valor de crescimento no volumétrico no mesmo período foi de 152%, valor bem aproximado da resistividade elétrica superficial.

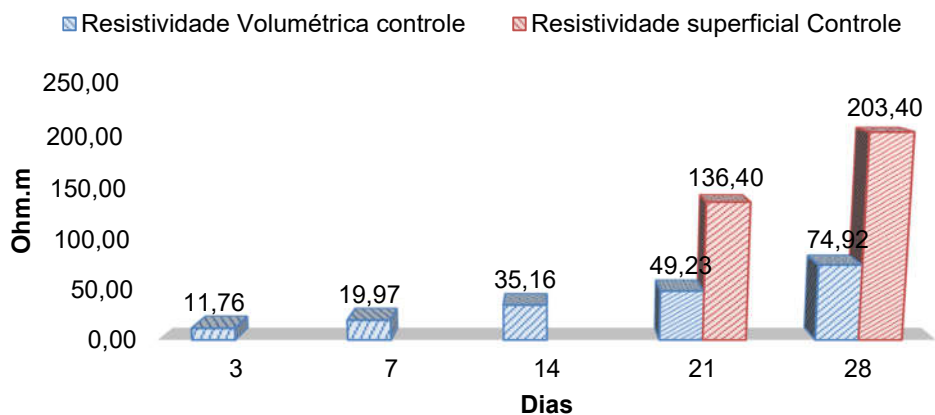
Figura 33: Gráfico de resistividade elétrica Superficial CPII



Fonte: Autor (2017)

Assim, comparando os dois métodos obtemos o gráfico de barras da FIGURA 34. Observa-se que o valor da resistividade elétrica superficial é bem superior ao da resistividade elétrica volumétrica.

Figura 34: Gráfico comparativo entre os métodos de resistividade – CPII

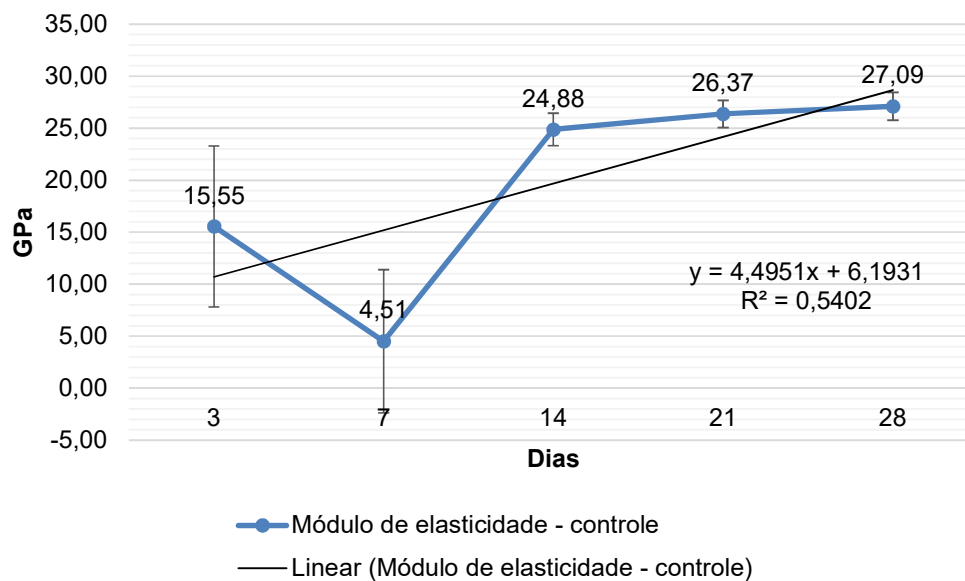


Fonte: Autor (2017)

O módulo de elasticidade dinâmico foi medido no ensaio do cimento Portland II, os valores iniciais foram comprometidos por dificuldades em operação do aparelho. Por isso obteve uma dispersão dos dados maior que o usual como

monstra a FIGURA 35. Porém os dados que serão analisados são das datas quatorze, vinte e um e vinte e oito dias da data de confecção das amostras. O tem um crescimento exponencial e linear nestes dias de ensaio com um crescimento de 109% aproximadamente.

FIGURA 35: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico do CPII

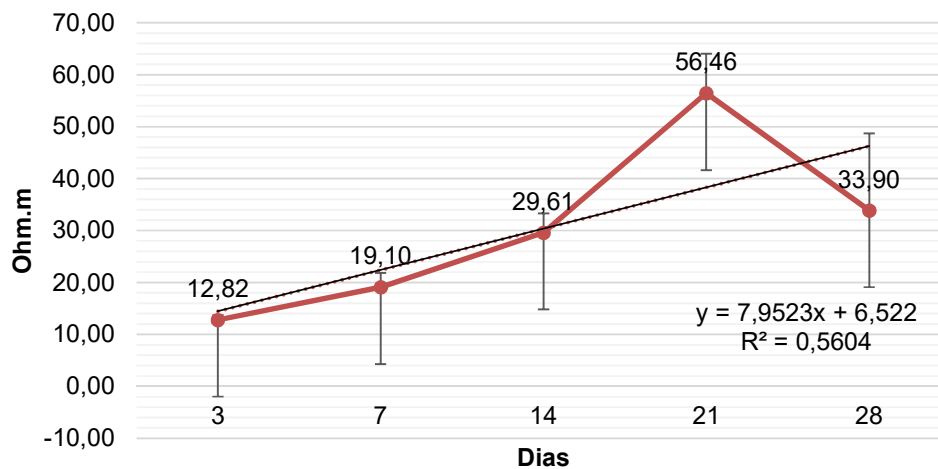


Fonte: Autor (2017)

Grupo compressão

Nos ensaios foram feitos corpos de prova para romper a cada dia ensaiado do grupo controle. Foram realizados os mesmos ensaios do grupo controle com o ensaio extra de resistência mecânica a compressão. A FIGURA 36 mostra os dados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica no grupo compressão. Os dados apresentaram uma evolução constante até o dia 28 da confecção da amostra. A grande dispersão demonstrada no gráfico é devida as amostras terem sido confeccionadas a mão.

Figura 36: Gráfico de resistividade volumétrica CPII

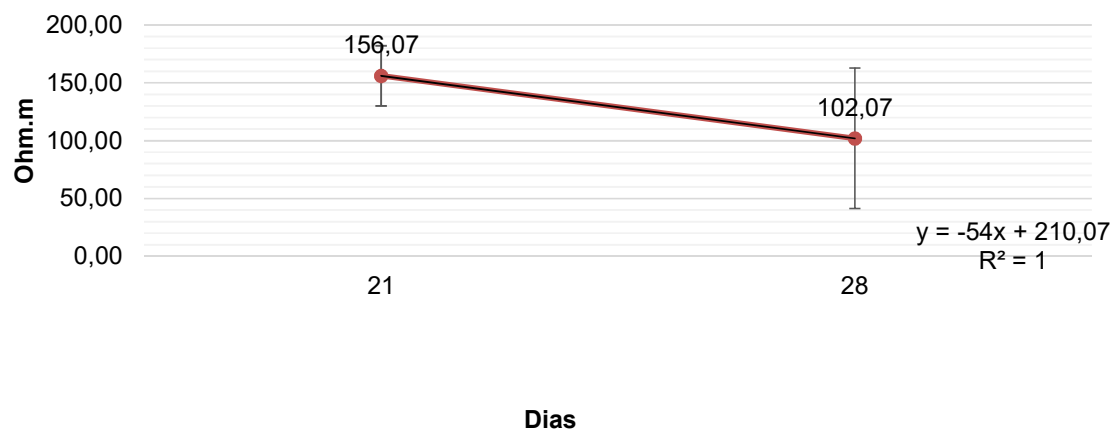


- Resistividade Volumétrica Compressão
- Linear (Resistividade Volumétrica Compressão)
- Linear (Resistividade Volumétrica Compressão)

Fonte: Autor (2017)

Como observado na FIGURA 37, há uma relação da resistividade elétrica volumétrica e a superficial no corpo de prova. Ambos decrescem do dia 21 ao dia 28, claramente demonstra uma diferença na confecção dos corpos de prova, já que o traço e os materiais são os mesmos.

Figura 37: Gráfico de resistividade superficial CPII

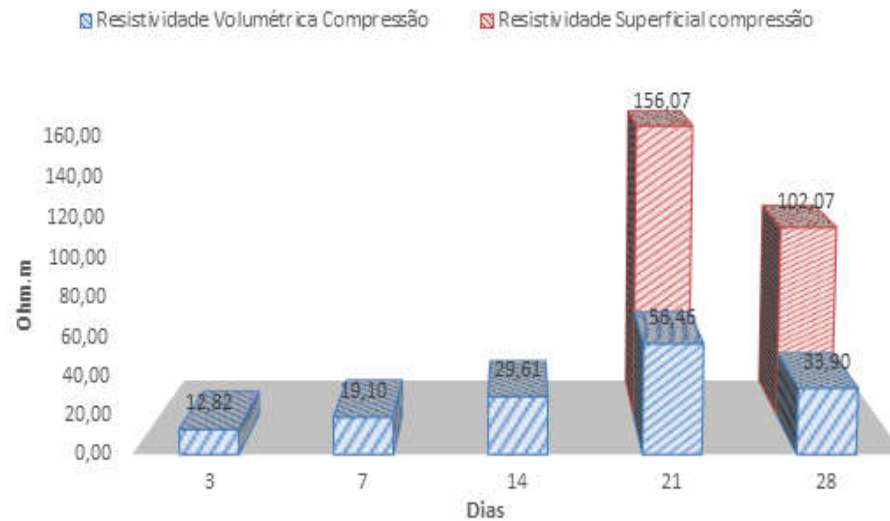


- Resistividade Superficial compressão
- Linear (Resistividade Superficial compressão)

Fonte: Autor (2017)

A partir dos gráficos acima se pode construir um gráfico de barras comparativo (FIGURA 38), nele pode-se observar uma relação entre as resistividades nos dias 21 e 28 onde há a possibilidade de comparação.

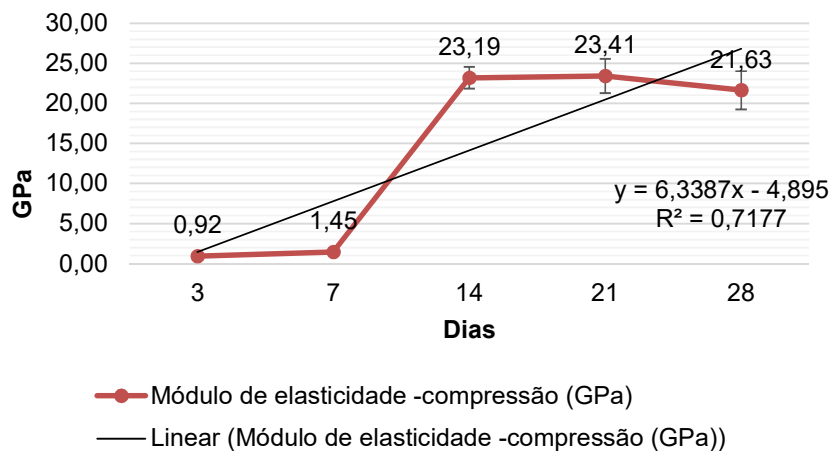
FIGURA 38: Gráfico de barras comparativo entre os métodos – CPII compressão



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 39 demonstra o módulo de elasticidade dinâmico dos ensaios do grupo compressão do CII. Nas idades iniciais houve problema na medição então desconsiderar o repentino acréscimo. Nota-se uma elevada dispersão nos dados nas datas 14, 21 e 28. Isto ocasionado pela confecção manual dos corpos de prova e a não uniformidade.

FIGURA 39: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico do CII



Fonte: Autor (2017)

Por fim a FIGURA 40 mostra o gráfico de resistência mecânica à compressão do CII.

FIGURA 40: Gráfico de resistência mecânica à compressão CPII

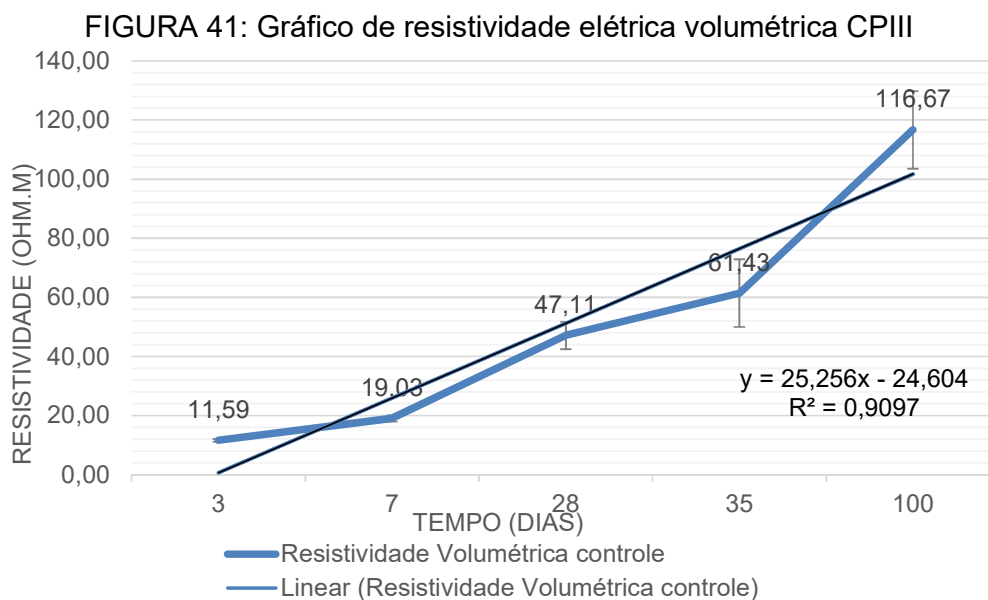


Fonte: Autor (2017)

4.2.4. ENSAIO COM CPIII.

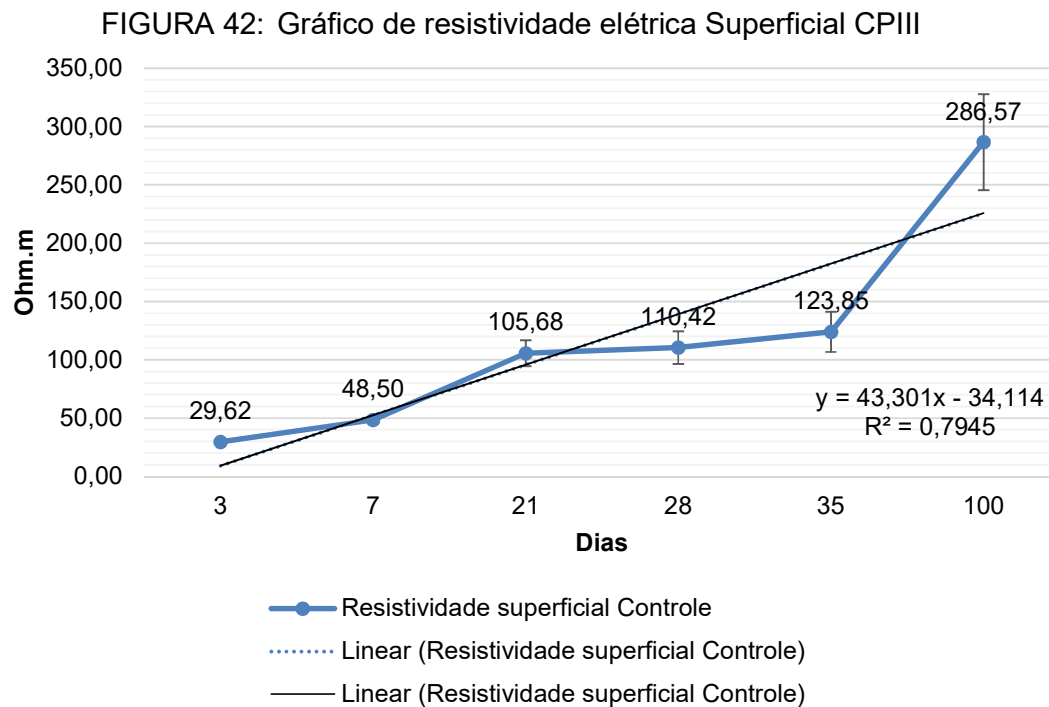
Grupo controle

Observando a FIGURA 41 pode-se notar uma evolução da resistividade elétrica volumétrica do cimento Portland III nos dias ensaiados. O valor aos três dias é de 11,59 Ohm.m e o valor final aos 100 dias é de 116,67 Ohm.m, há elevação de 1007%, aproximadamente, de aumento entre as datas desde a concretagem dos corpos de prova. Pode-se observar pelo gráfico que quanto maior o tempo posterior a concretagem maior é o desvio padrão da amostra.



Fonte: Autor (2017)

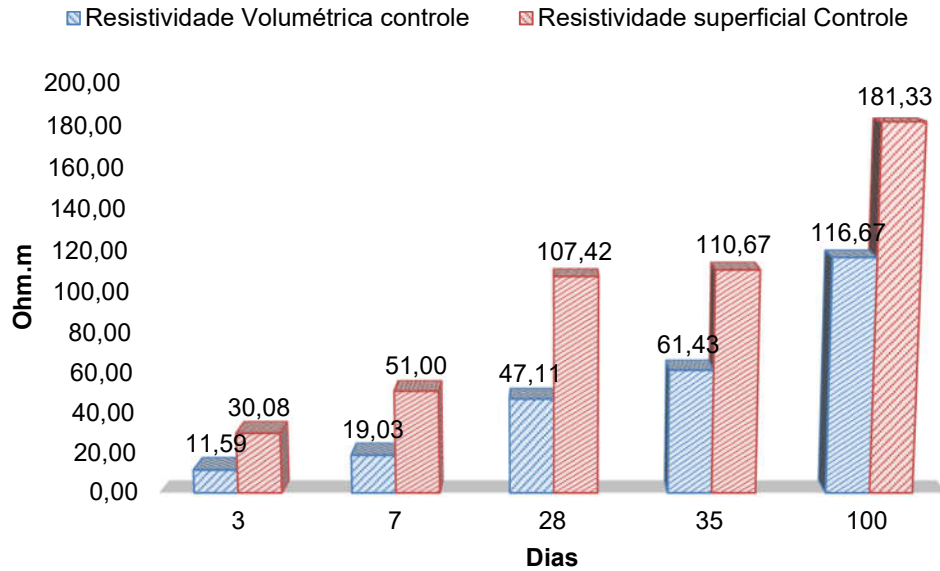
A resistividade elétrica superficial do grupo controle do CPIII obteve valores crescente, como demonstrado na FIGURA 42, com um valor inicial aos três dias é de 29,62 Ohm.m e o valor final aos 100 dias de 286,56 Ohm.m. A diferença entre o valor inicial e final é de aproximadamente 967%, e, como pode observar, o desvio padrão também aumenta com o passar do tempo após a concretagem.



Fonte: Autor (2017)

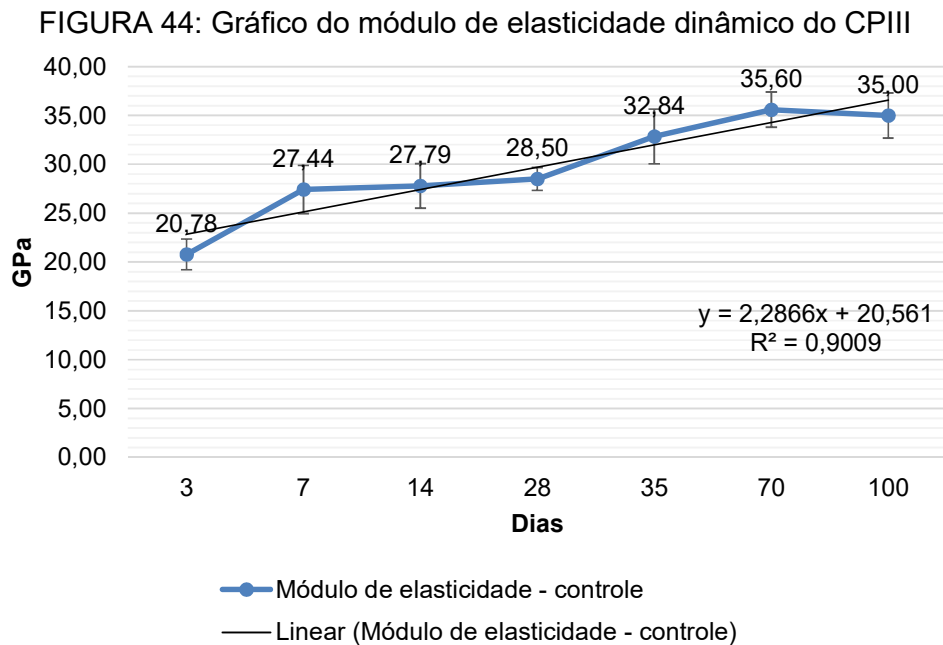
Em comparação aos métodos de análise da resistividade elétrica tem-se a FIGURA 43, onde resistividade elétrica superficial do grupo controle do CPIII obteve valores, proporcionalmente, bem semelhantes à resistividade elétrica volumétrica medida.

FIGURA 43: Gráfico comparativo entre os métodos de resistividade – CPIII



Fonte: Autor (2017)

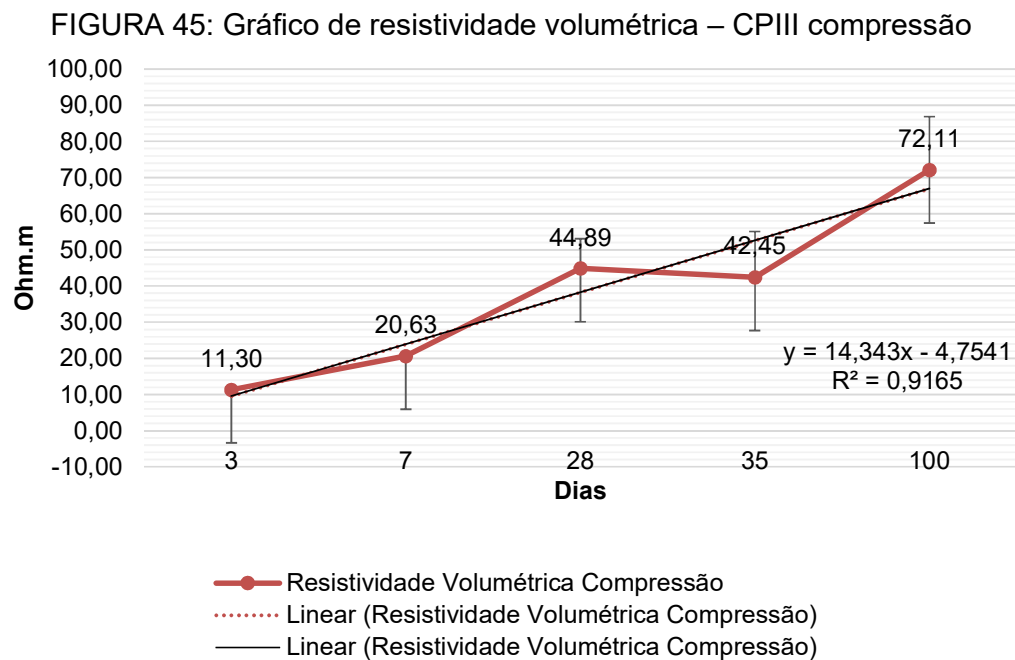
A FIGURA 44 se refere aos dados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada nos corpos de prova confeccionados com cimento Portland III. Pode-se observar um crescimento dos valores do módulo durante o procedimento. A uma curva ascendente com uma estabilização após os 35 dias de ensaio.



Fonte: Autor (2017)

Grupo Compressão

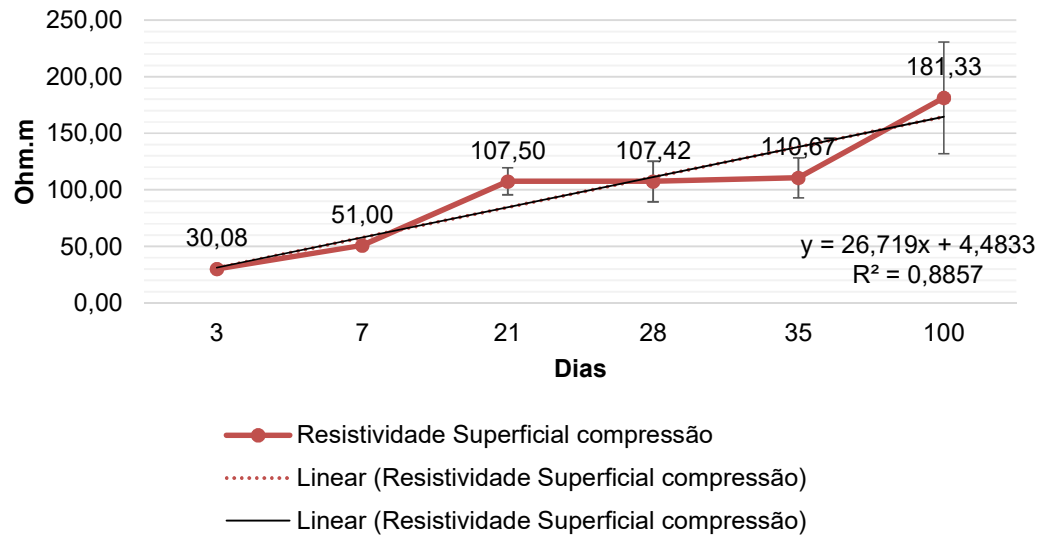
A FIGURA 45 mostra os dados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica no grupo compressão para o CPIII. Os resultados apresentam uma evolução do dia 3 a dia 100 com um pico variante no dia 28 da confecção da amostra. Há uma dispersão de erro bem considerável na amostra que faz com que a linha linear tenha seu valor inferior ao apresentado na figura. O valor do dia 3 é de 11,30 Ohm.m e no dia 100 é de 72,11 Ohm.m, o valor diferencial é 638% entre as datas



Fonte: Autor (2017)

O gráfico da resistividade elétrica superficial (FIGURA 46) tem uma projeção parecida com a resistividade elétrica volumétrica. O valor do dia 3 é de 30,08 Ohm.m e no dia 100 é de 181,33 Ohm.m, o valor diferencial é 603% entre as datas, valores bem próximos, também, a resistividade volumétrica da FIGURA 45.

FIGURA 46: Gráfico de resistividade superficial – CPIII compressão

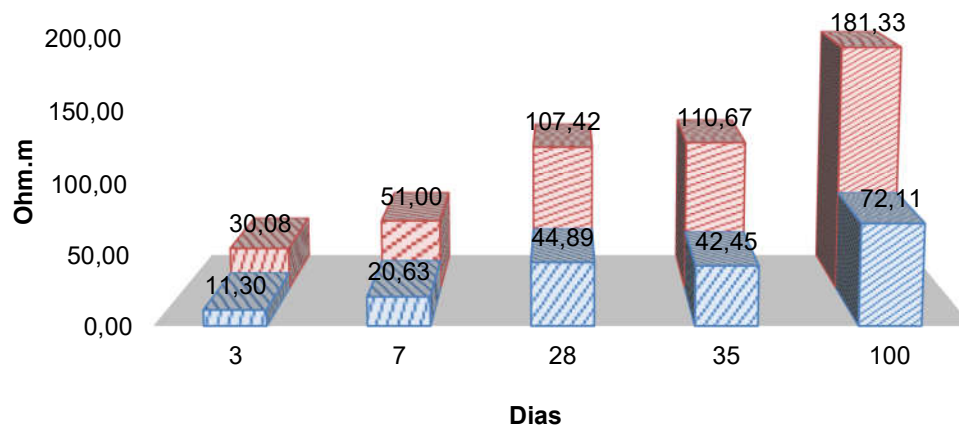


Fonte: Autor (2017)

Com os dados obtidos nos dois gráficos acima pode-se construir um gráfico de barras comparativo entre as resistividades (FIGURA 47), há uma possibilidade de comparação entre os métodos devido à proximidade de variação entre os resultados.

FIGURA 47: Gráfico de barras comparativo entre os métodos – CPIII compressão

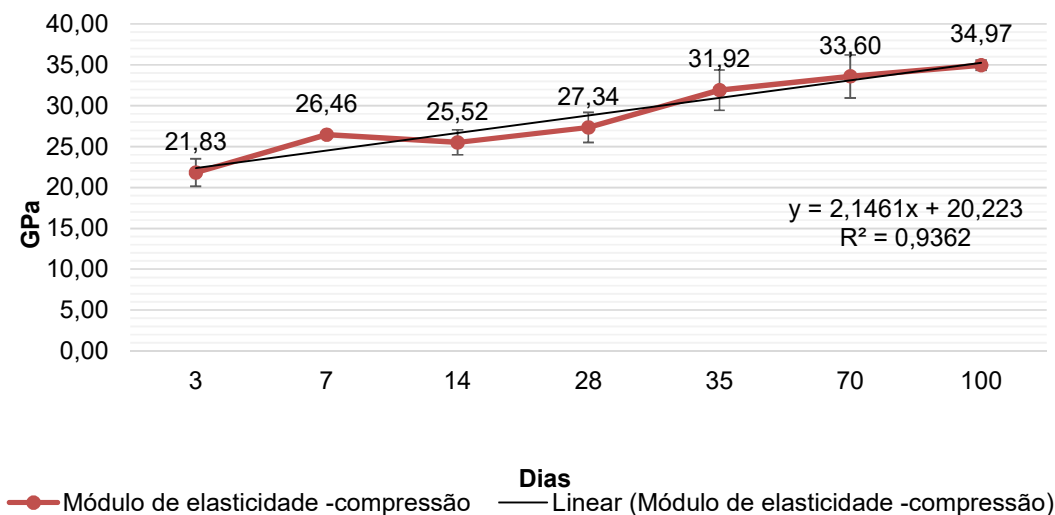
■ Resistividade Volumétrica Compressão ■ Resistividade Superficial compressão



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 48 expõe os dados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada para os corpos de prova CPIII é um gráfico ascendente, lembrando que a cada dia são feitos ensaios com corpo diferentes devido ao ensaio de resistência mecânica a compressão. Por isso ocorrem alguns picos alternativos nos ensaios do grupo compressão.

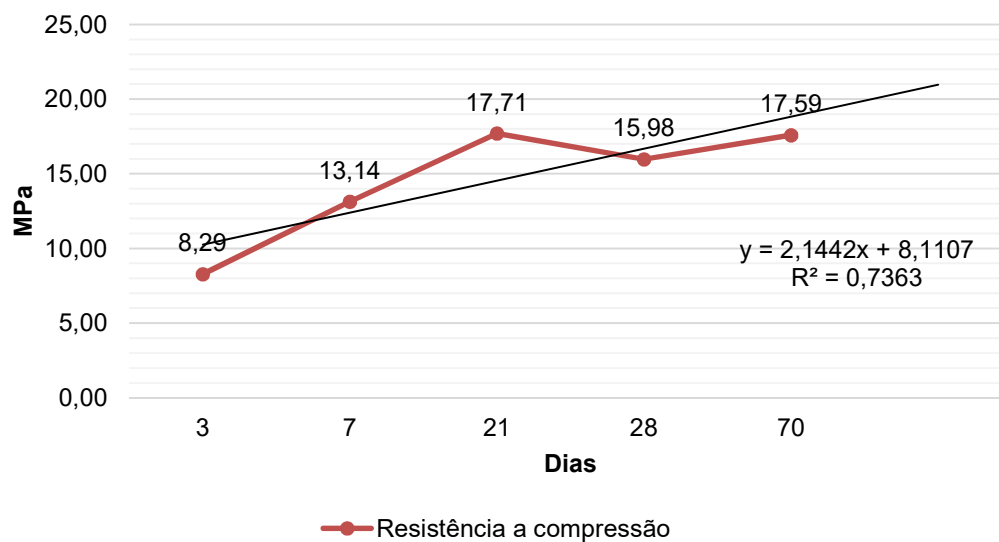
FIGURA 48: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico – CPIII compressão



Fonte: Autor (2017)

Por fim a FIGURA 49 mostra o gráfico de resistência mecânica à compressão do CPIII, com uma queda significativa no dia 28, para o dia 21.

FIGURA 49: Gráfico de resistência mecânica à compressão – CPIII compressão

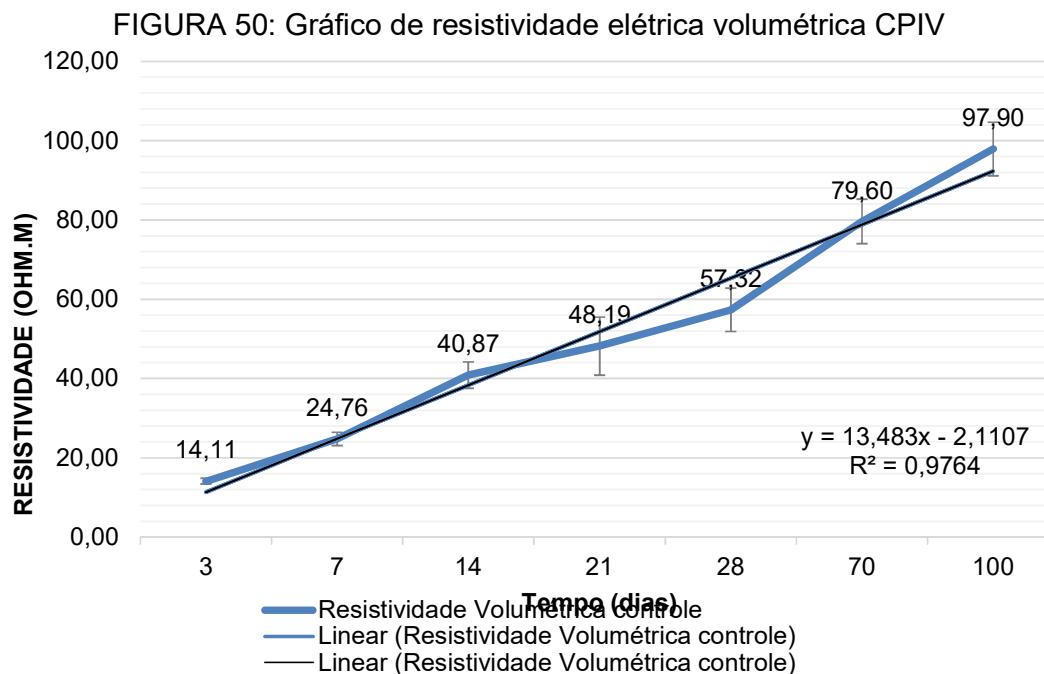


Fonte: Autor (2017)

4.2.5. ENSAIOS COM CPIV.

Grupo controle

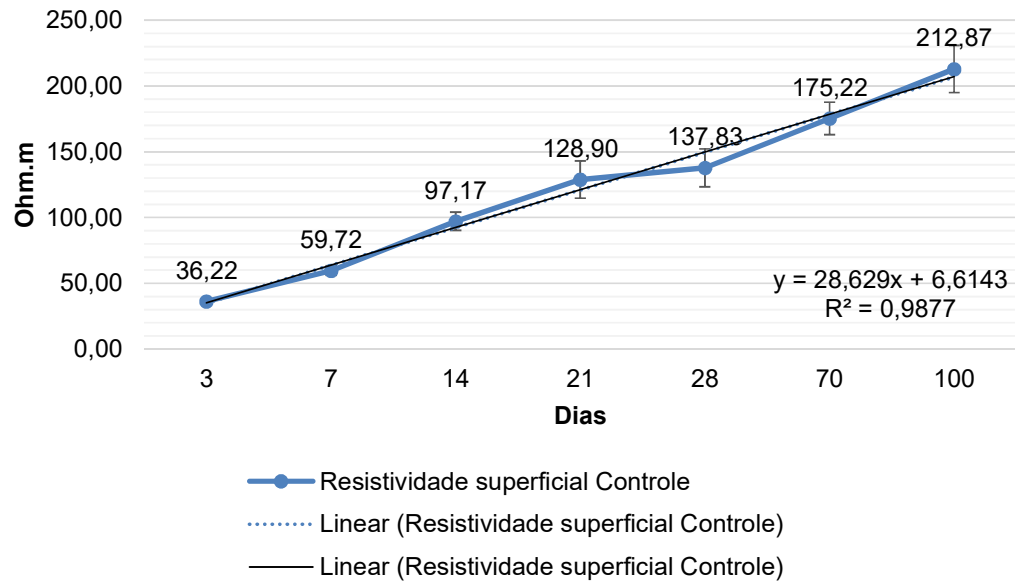
A FIGURA 50 é um gráfico da evolução resistividade elétrica volumétrica ensaiada com cimento CPIV. O valor aos três dias é de 14,11 Ohm.m e o valor final aos 100 dias é de 97,90 Ohm.m, um aumento de 694%, aproximadamente, entre as datas desde a concretagem dos corpos de prova. A evolução da resistividade é quase linear se comparada à linha linear.



Fonte: Autor (2017)

Bem próximo à resistividade elétrica volumétrica, a resistividade elétrica superficial (FIGURA 51) do CPIV do grupo controle do CPIII obteve valores crescente. Com um baixo desvio padrão a resistividade a curva do gráfico tem um aspecto bem linear. A diferença entre o valor inicial e final é de aproximadamente 588%, de aumento com o passar do tempo após a concretagem.

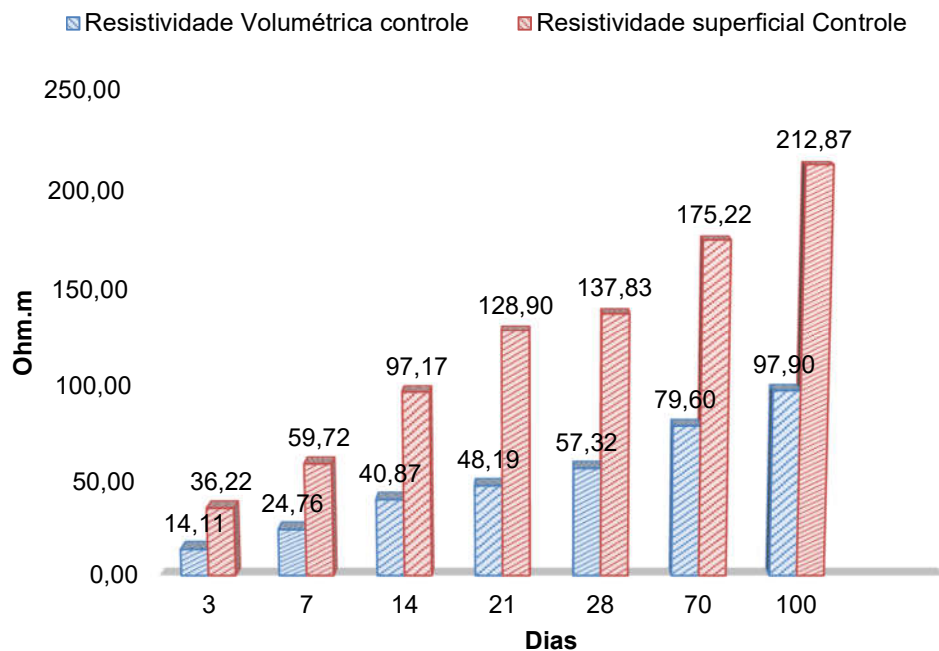
FIGURA 51: Gráfico de resistividade elétrica Superficial CPIV



Fonte: Autor (2017)

Comparando a FIGURA 50 e 51 tem-se um gráfico de barras demonstrado na FIGURA 52 onde as resistividades elétricas obtiveram valores semelhantes.

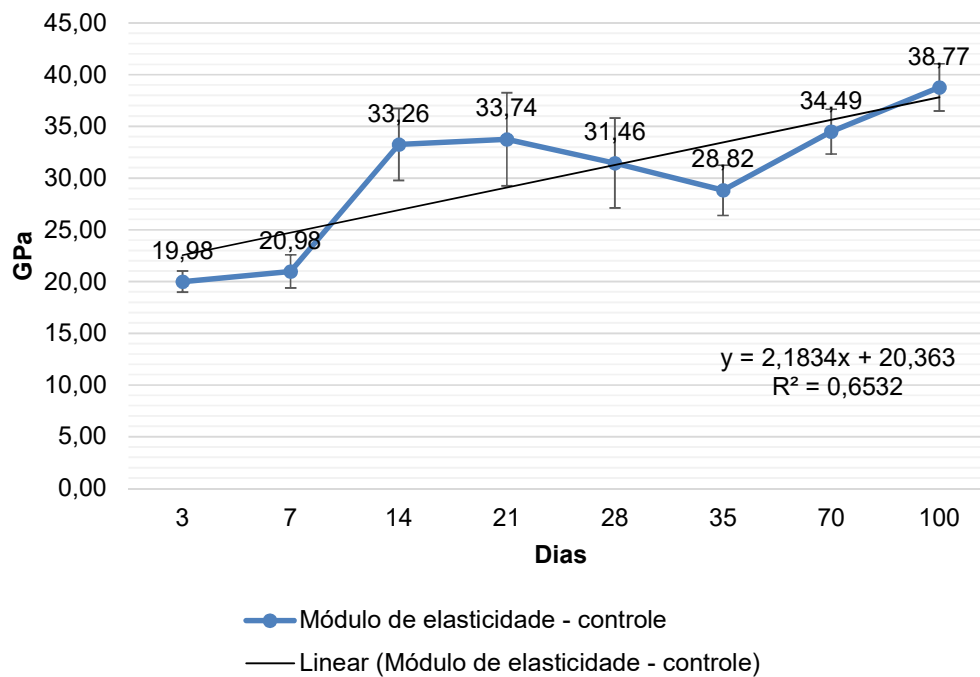
FIGURA 52: Gráfico comparativo entre os métodos de resistividade – CPIV



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 53 se refere aos dados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada nos corpos de prova confeccionados com cimento Portland IV. Comparada com os valores de resistividade elétrica fica difícil fazer uma relação direta entre os gráficos.

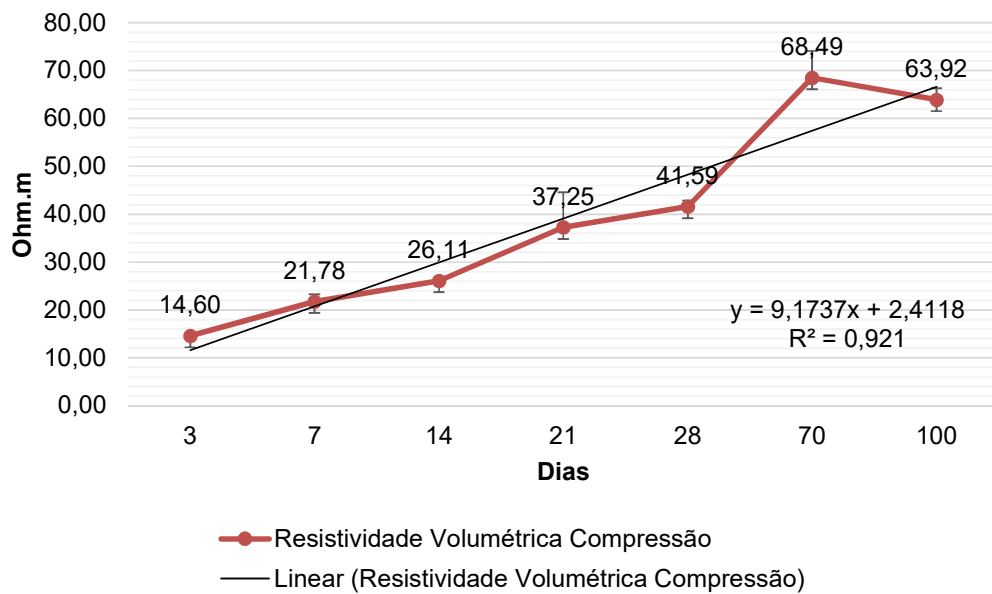
FIGURA 53: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico do CPIV



Grupo Compressão

A FIGURA 54 mostra os dados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica no grupo compressão para o CPIV. A dispersão de erro é bem reduzida nestas amostras, bem como a linha linear tem uma inclinação pouco acentuada. A queda do valor entre o dia 70 e o dia 100 é devido à medição ser em corpos de prova diferentes.

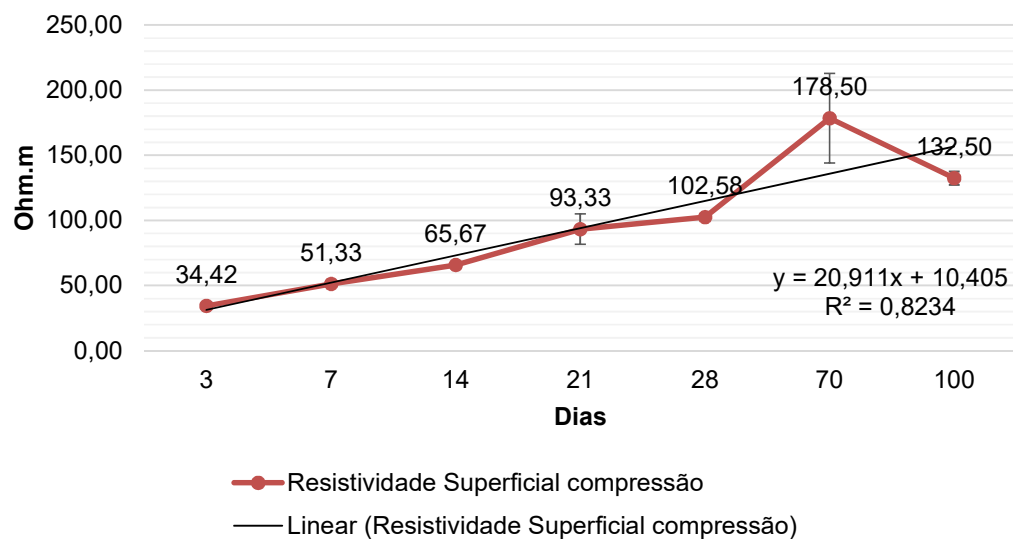
Figura 54: Gráfico de resistividade volumétrica – CPIV compressão



Fonte: Autor (2017)

Pode-se observar que a FIGURA 55 possui um formato bem parecido com o da FIGURA 54, inclusive a queda dos valores no dia 100 do ensaio. Isso pode demonstrar uma possível relação entre as resistividades elétrica..

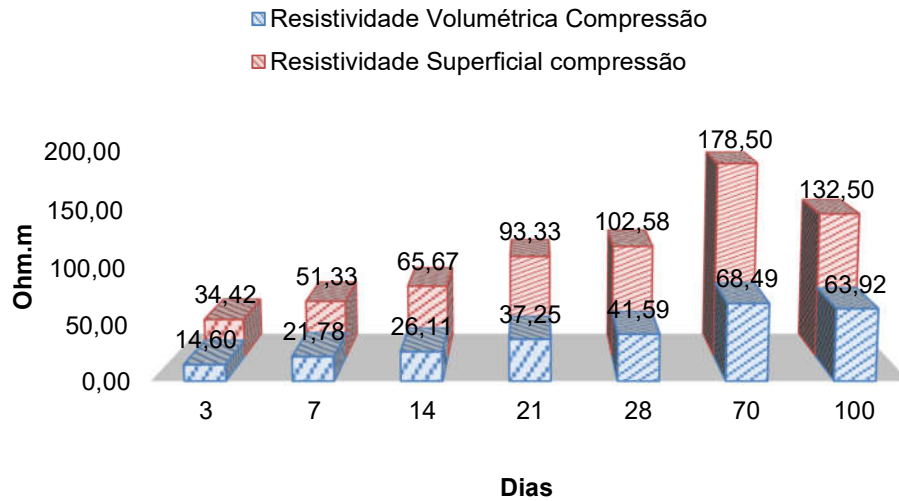
FIGURA 55: Gráfico de resistividade superficial – CPIV compressão



Fonte: Autor (2017)

FIGURA 56 demonstra os valores dos ensaios de resistividade elétrica em forma de gráfico de barras para melhor comparação entre os métodos.

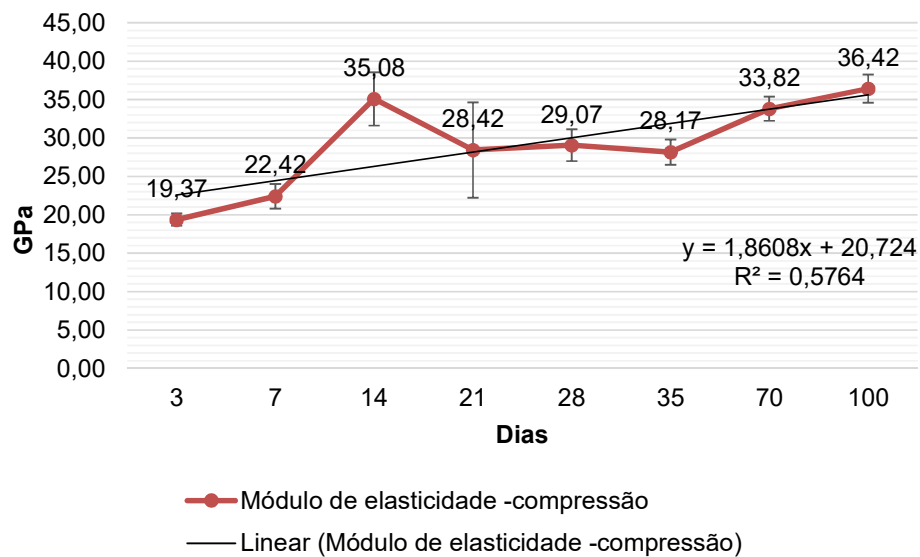
FIGURA 56: Gráfico de barras comparativo entre os métodos – CPIV compressão



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 57 demonstra os dados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada para os corpos de prova CPIV, há uma distorção na data de 14 dias e um grau de dispersão alto no dia 21. Este gráfico não é possível relacionar aos gráficos de resistividade elétrica acima.

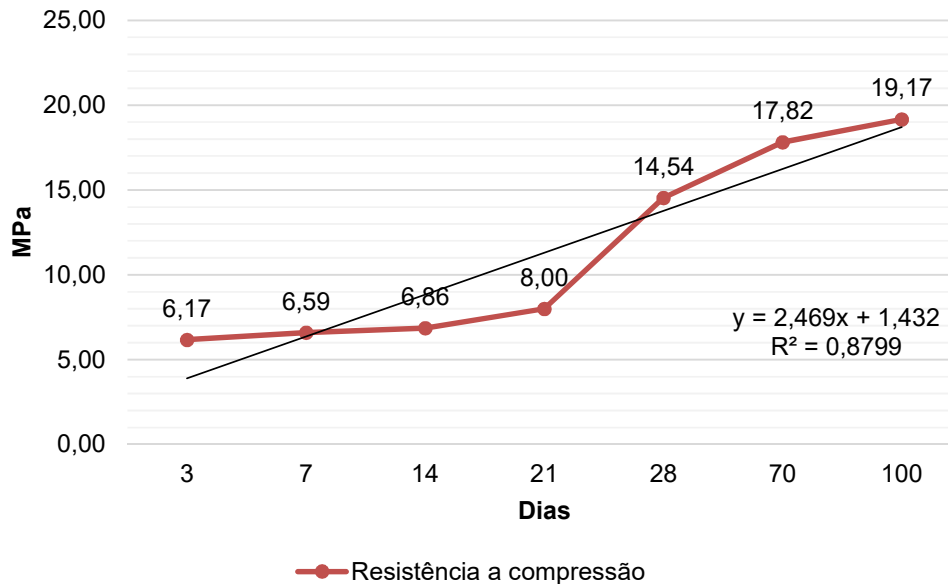
FIGURA 57: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico – CPIV compressão



Fonte: Autor (2017)

O gráfico de resistência mecânica a compressão do CPIV, FIGURA 58, apresenta um crescimento elevado após os 28 dias de ensaio. Lembrando que os valores baixos de resistência mecânica a compressão é devido à cura não realizada para trabalhar numa situação crítica em obra.

FIGURA 58: Gráfico de resistência mecânica à compressão– CPIV compressão

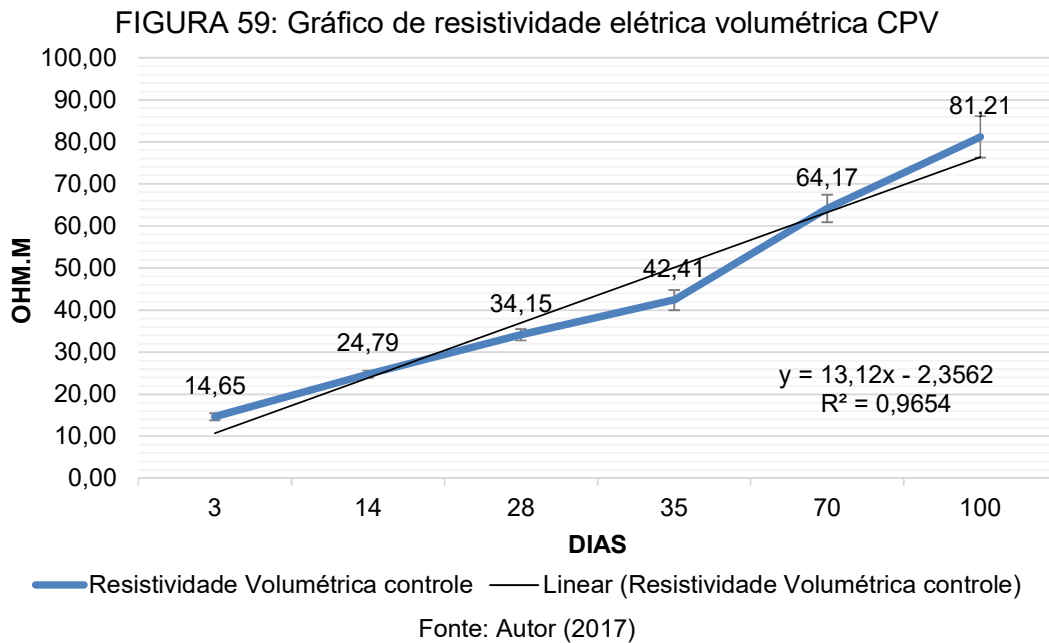


Fonte: Autor (2017)

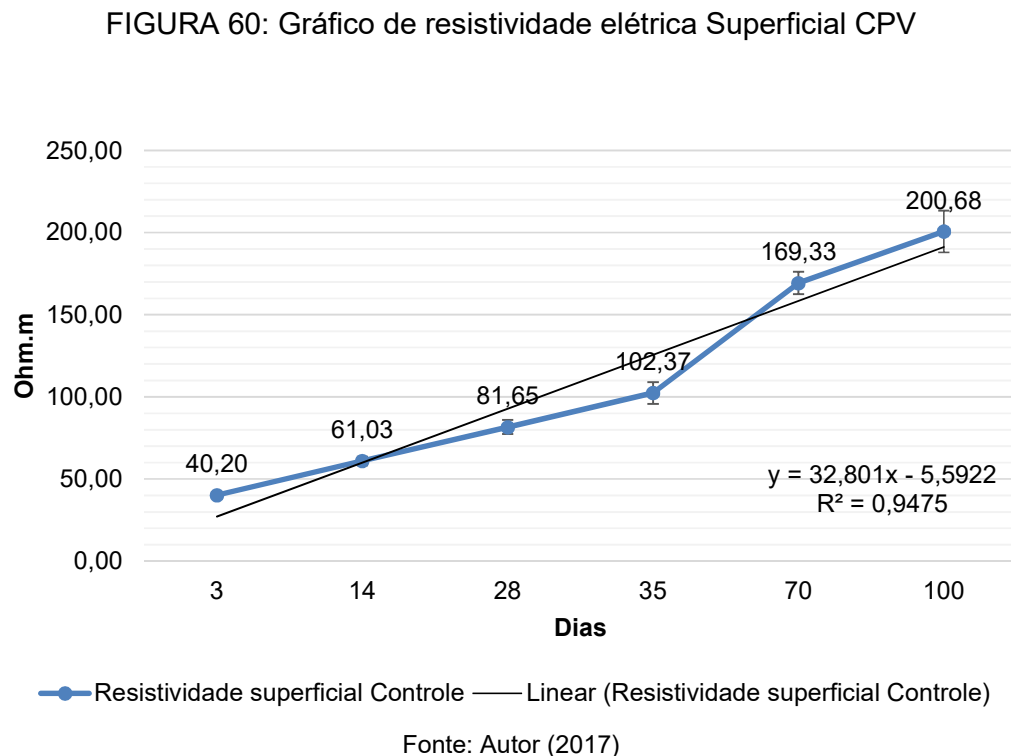
4.2.6. ENSAIOS COM CPV.

Grupo controle

A evolução da resistividade elétrica volumétrica do grupo controle do CPV é demonstrada FIGURA 59. O valor aos três dias é de 14,65 Ohm.m e o valor final aos 100 dias é de 81,21 Ohm.m, há uma elevação de 554%, aproximadamente, entre as datas desde a concretagem dos corpos de prova. Os valores do CPV são mais estáveis que s cimentos anteriores.

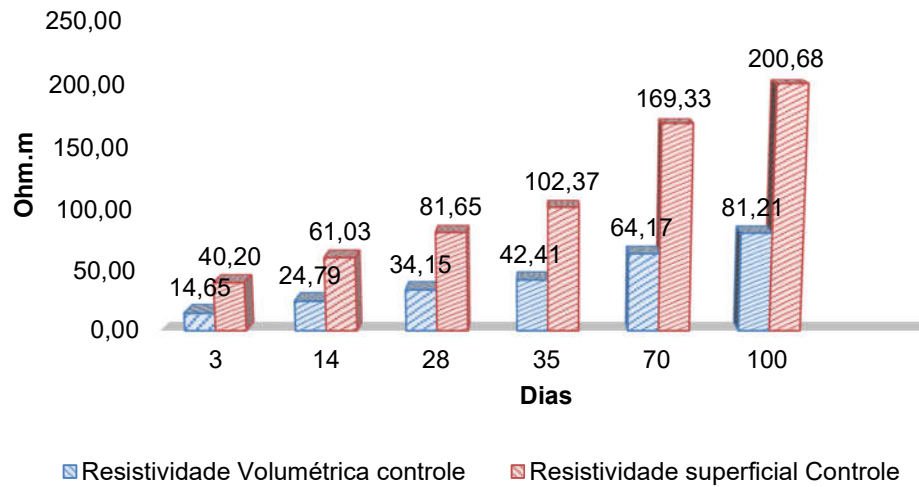


A resistividade elétrica superficial do grupo controle do CPV obteve valores crescente, como demonstrado na FIGURA 60, com um valor inicial aos três dias é de 40,20 Ohm.m e o valor final aos 100 dias de 200,68 Ohm.m. A diferença entre o valor inicial e final é de aproximadamente 500%, bem próximos ao observado na resistividade elétrica volumétrica da FIGURA 59.



Pode-se observar uma linearidade no crescimento quantitativo entre os processos de medição da resistividade elétrica do cimento Portland V, como demonstrado na FIGURA 61.

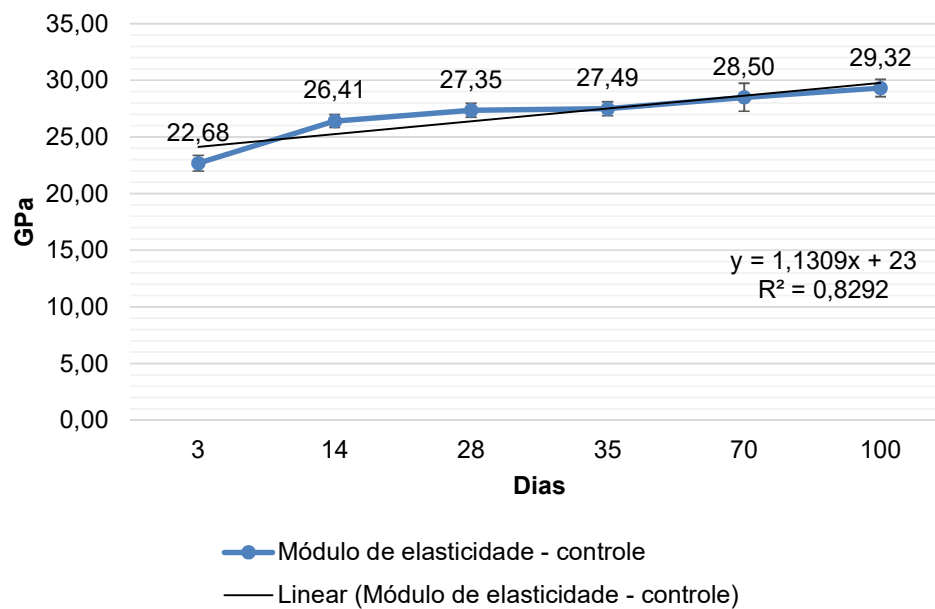
FIGURA 61: Gráfico comparativo entre os métodos de resistividade – CPV



Fonte: Autor (2017)

Os valores do módulo de elasticidade do grupo controle do ensaio e CPV são demonstrados na FIGURA 62.

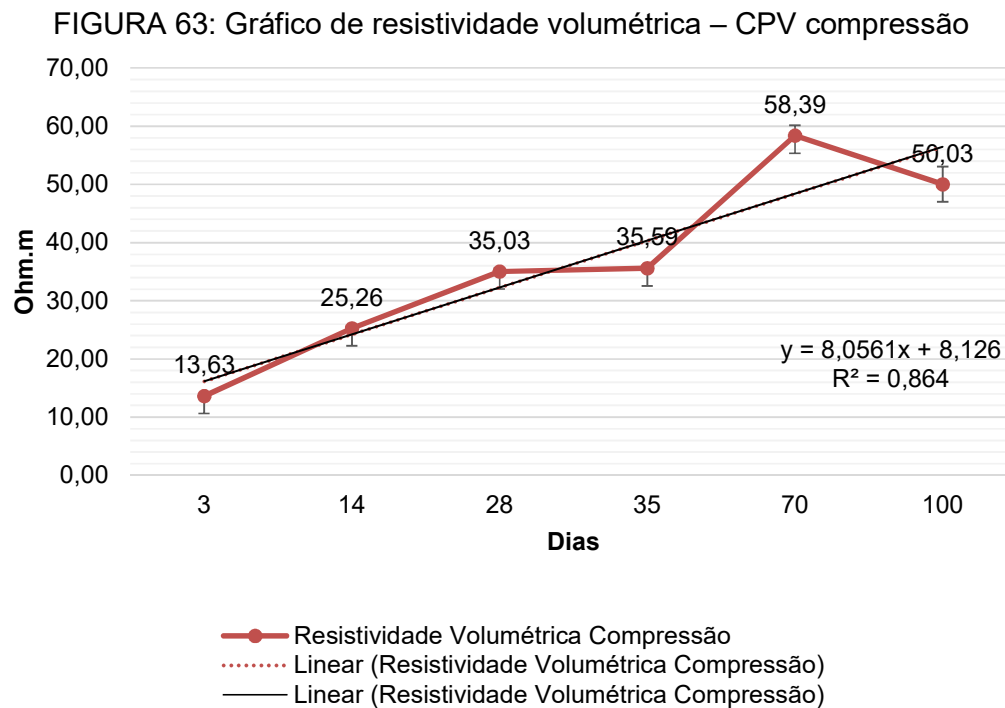
FIGURA 62: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico do CPV



Fonte: Autor (2017)

Grupo Compressão

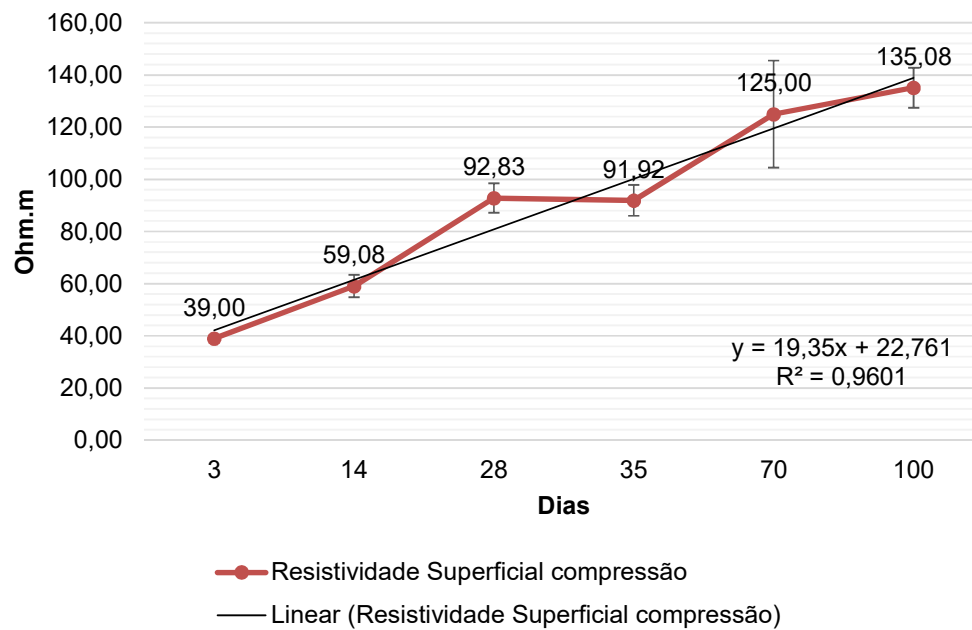
A FIGURA 63 mostra os dados do ensaio de resistividade elétrica volumétrica no grupo compressão para o CPV. Os resultados obtidos apresentam uma evolução do dia 3 a dia 100 com um pico variante no dia 70 da confecção da amostra. Não há uma dispersão de erro bem considerável na amostra, porém no dia 70 há uma distorção nos dados. O valor do dia 3 é de 13,63 Ohm.m e no dia 100 é de 50,03 Ohm.m, o valor diferencial é 367% entre as datas



Fonte: Autor (2017)

O gráfico da resistividade elétrica superficial (FIGURA 64) tem uma projeção parecida com a resistividade elétrica volumétrica, porém no dia 70 o valor não se assemelha ao de da FIGURA 63, porém há uma dispersão muito grande no ensaio de resistividade superficial no dia 70, claramente demonstrando que há valores superiores aos do dia 100, assemelhando ao dado que foi colhido no gráfico acima. O valor do dia 3 é de 39 Ohm.m e no dia 100 é de 135,08 Ohm.m, o valor diferencial é 346% entre as datas, valores bem próximos, também, a resistividade volumétrica da FIGURA 63.

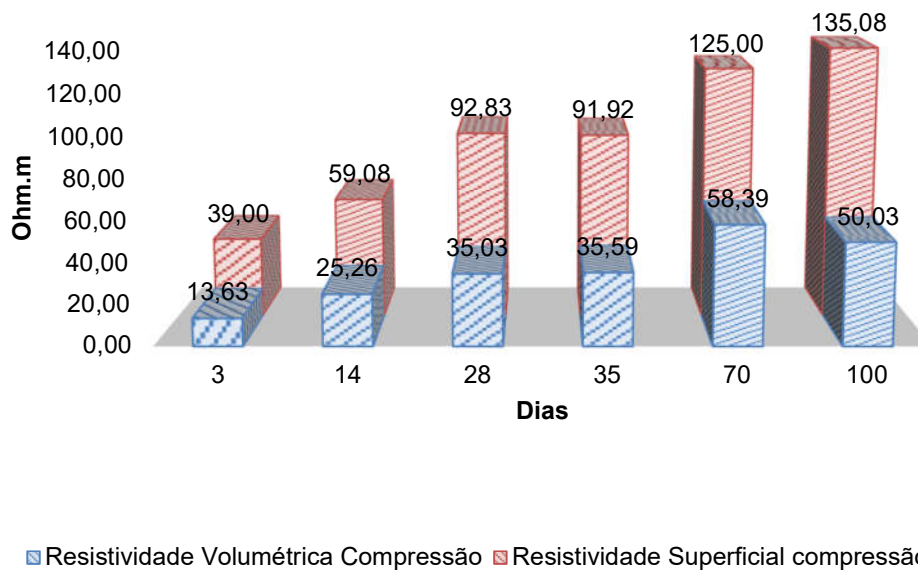
FIGURA 64: Gráfico de resistividade superficial – CPV compressão



Fonte: Autor (2017)

Com os dados obtidos nos dois gráficos acima se pode construir um gráfico de barras comparativo entre as resistividades (FIGURA 65).

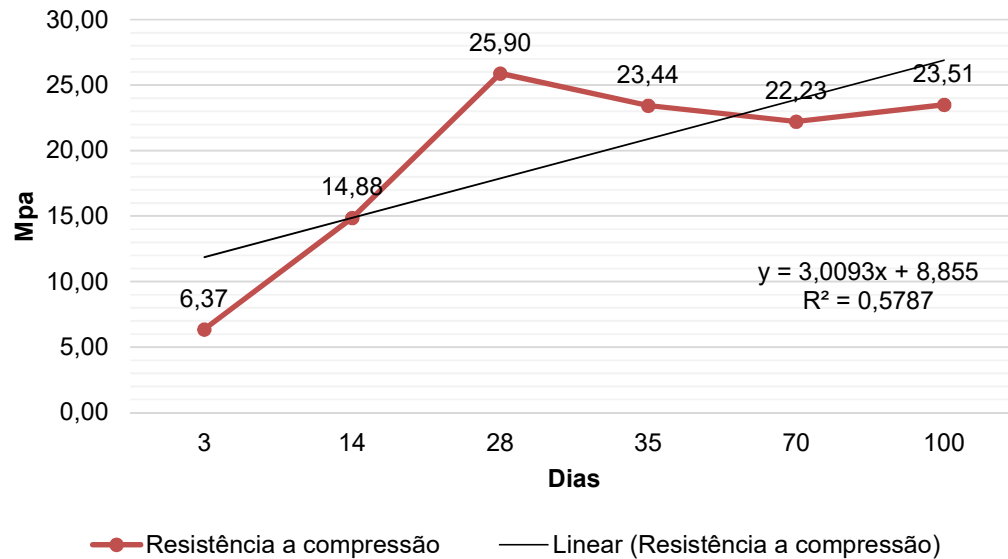
FIGURA 65: Gráfico de barras comparativo entre os métodos – CPV compressão



Fonte: Autor (2017)

Dados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada para os corpos de prova CPV são demonstrados na FIGURA 66.

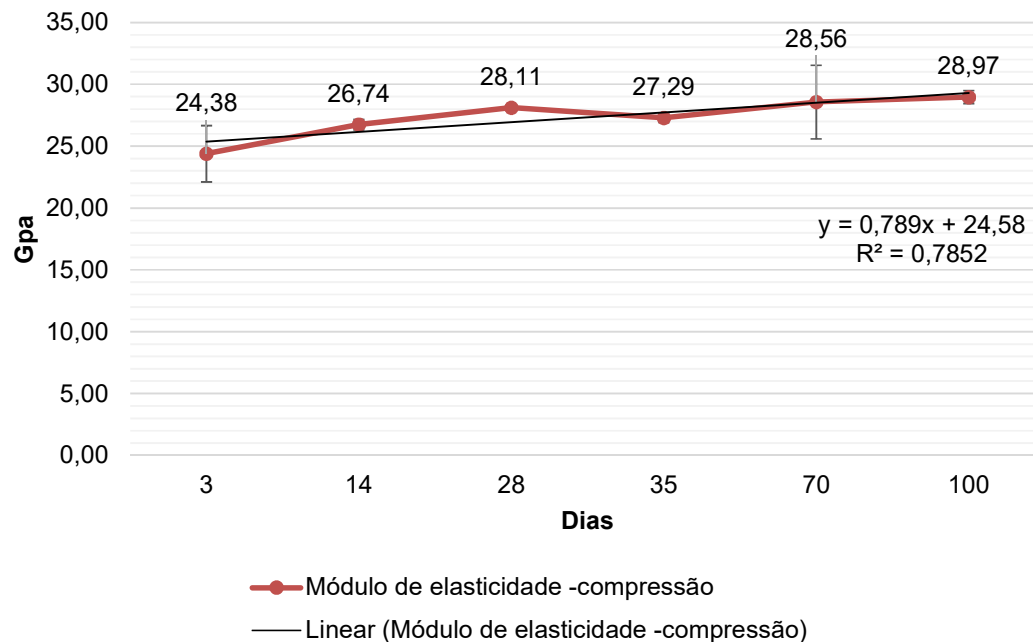
FIGURA 66: Gráfico do módulo de elasticidade dinâmico – CPV compressão



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 67 mostra o gráfico de resistência mecânica à compressão do CPV, apresenta característica linear, com uma pequena variação no dia 35 e uma alta dispersão no dia 70.

FIGURA 67: Gráfico de resistência mecânica à compressão–CPV compressão

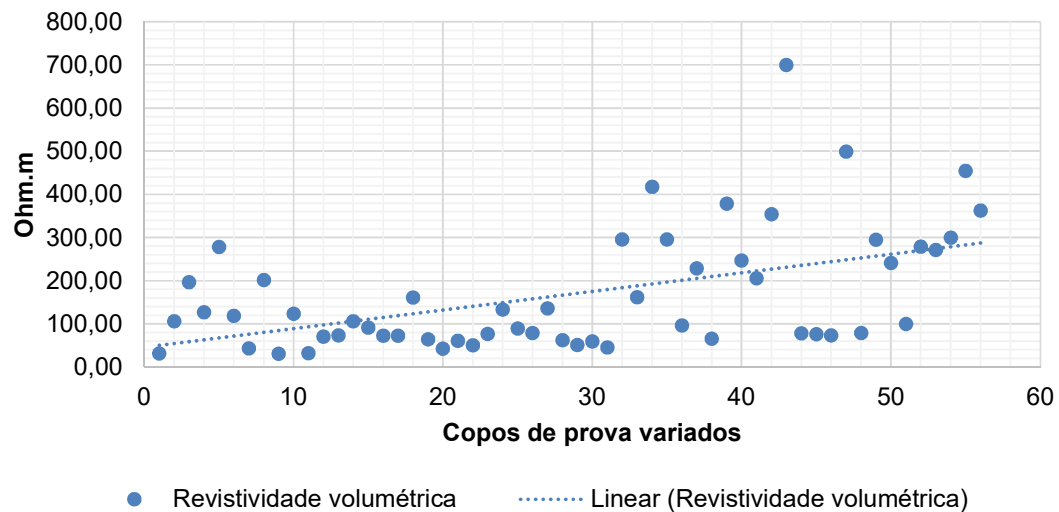


Fonte: Autor (2017)

4.2.7. ENSAIO COM CP'S VARIADOS

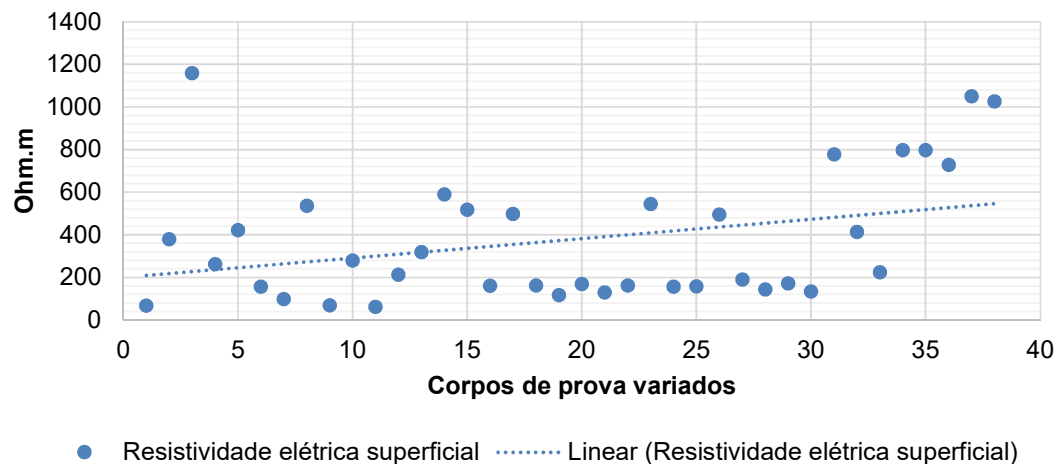
Neste ensaio foram utilizados 50 corpos de provas de variadas proveniências para realizar uma comparação das análises nos concretos cimentos Portland anteriores confeccionados em laboratório. Na FIGURA 68 demonstra uma análise por dispersão entre os corpos de provas estudados, nota-se uma variação entre as amostras, mas uma grande maioria abaixo dos 100 Ohm.m

FIGURA 68: Gráfico de dispersão de resistividade elétrica volumétrica nos CP Variados



Fonte: Autor (2017)

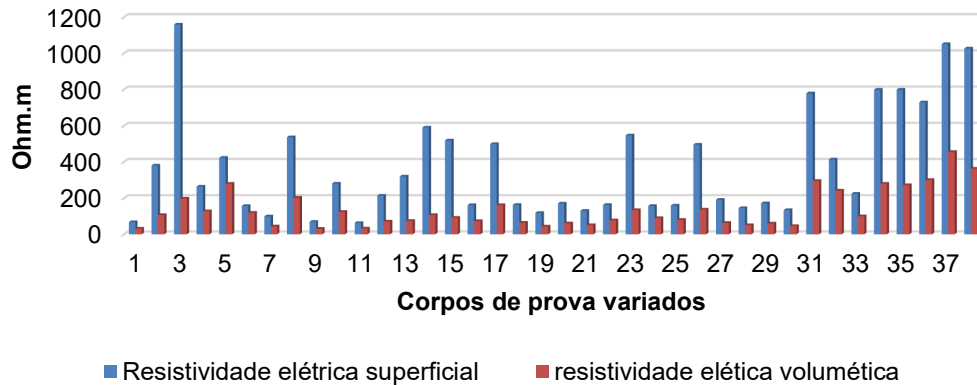
FIGURA 69: Gráfico de dispersão de resistividade elétrica Superficial nos CP Variados



Fonte: Autor (2017)

Comparando a FIGURA 67 e a FIGURA 68 construiu-se um gráfico de barra para demonstrar a relação entre os métodos de medição da resistividade elétrica. Pode-se notar que em muitos corpos de prova há uma similaridade entre as relações. Alguns estão bem fora do desvio padrão, porém não se tem informações sobre a amostra para determinar o porquê desta situação.

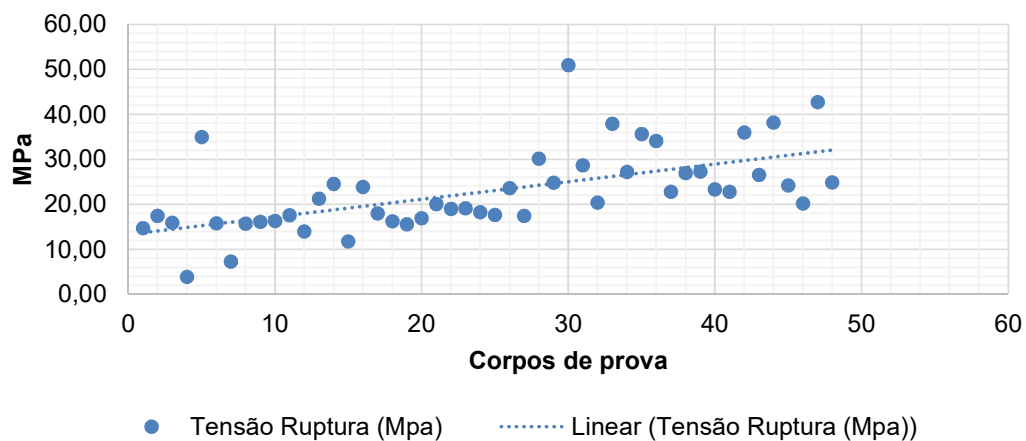
FIGURA 70: Gráfico de comparação entre os métodos de análise de resistividade elétrica Superficial e volumétrica nos CP's Variados



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 71 mostra um gráfico de dispersão da medição da resistência mecânica a compressão dos corpos de prova variados. Podendo observar que a grande maioria dos corpos de prova entre 15 e 30 MPa.

FIGURA 71: Gráfico de dispersão de resistência mecânica a compressão nos CP Variados



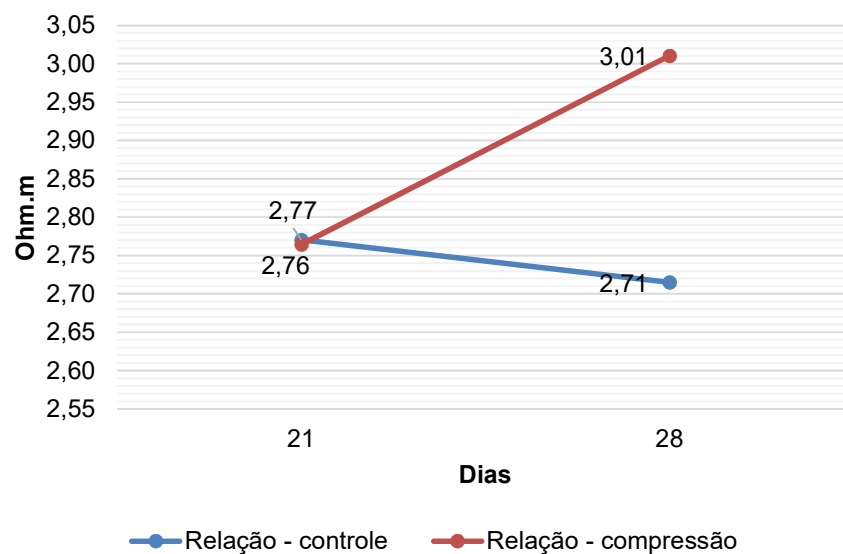
Fonte: Autor (2017)

Ao relacionar as resistividades, do grupo controle e do grupo compressão, com o passar dos dias de concretagem das amostras houve uma diferença entre as resistividades. Isso decorre devido o processo de hidratação do cimento do grupo controle, já que neste grupo foi utilizada cura submersa. Com base em Lencioni (2010) a evaporação da água da pasta cimentícia é de 20% após a hidratação, os resultados deram diferentes do demonstrado por Lencioni (2010) apud Woelf e Lauer, que a resistividade elétrica no corpo de prova curado ao ar quando comparados com corpos de prova submetidos a cura úmida. Esse aumento é devido à evaporação da água livre, que é condutora de corrente pelo concreto. Essa situação é possivelmente explicável devido a processo de medição da resistividade elétrica. O processo de Woelf e Lauer é uma medição da resistividade a seco, e o processo utilizado por esta dissertação é do corpo de prova saturado por água.

4.2.8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

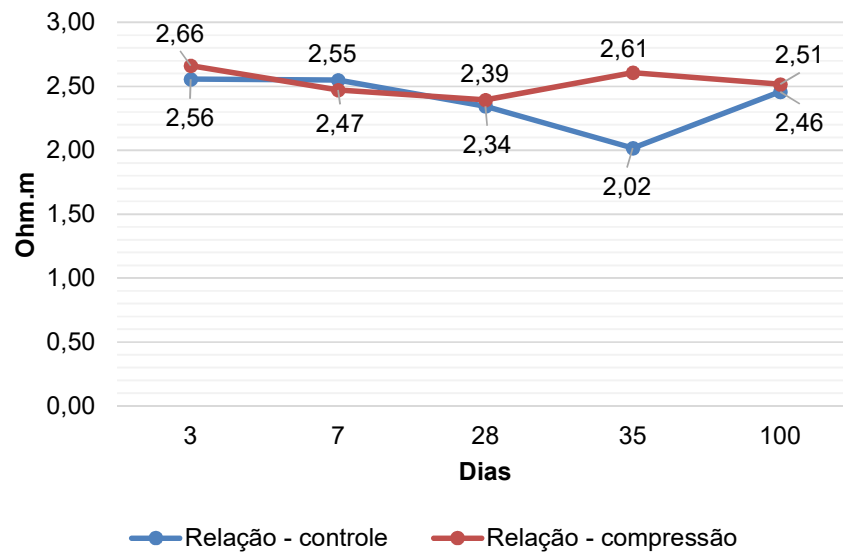
Analisando as razões médias entres os modos de medição da resistividade elétrica dos corpos de prova dos CP confeccionados em laboratório FIGURAS 72 a 75 pode-se observar em uma relação aproximada entre elas. Em alguns casos a uma variação muito grande como exemplo na FIGURA 72 no dia 28.

Figura 72: Gráfico de análise comparativa da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com CPII



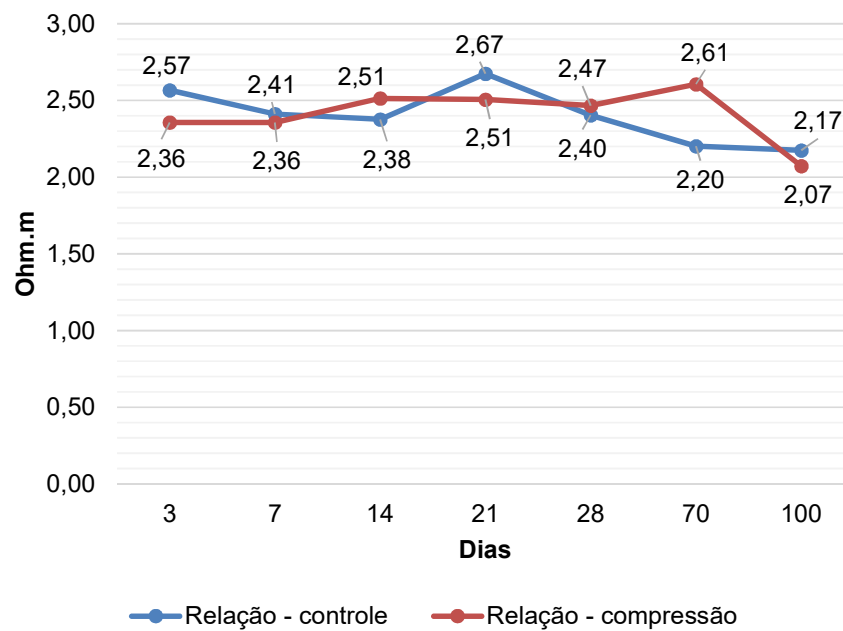
Fonte: Autor (2017)

Figura 73: Gráfico de análise comparativa da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com CPII



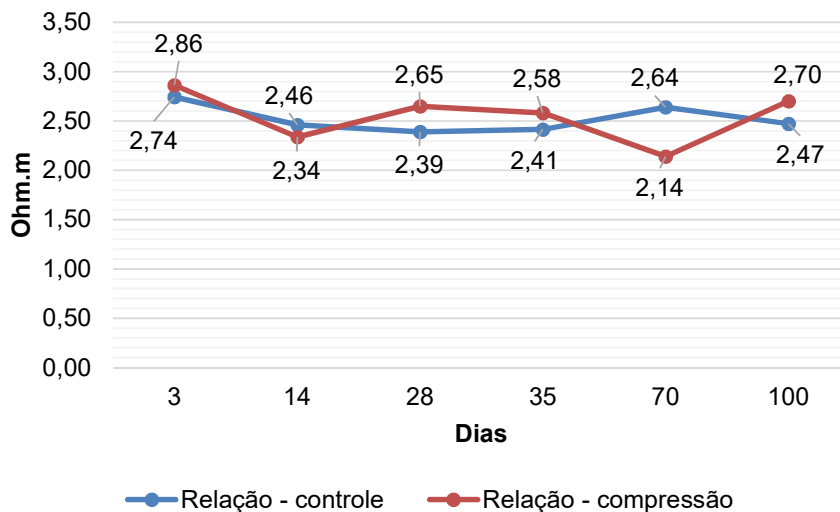
Fonte: Autor (2017)

Figura 74: Gráfico de análise comparativa da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com CPII



Fonte: Autor (2017)

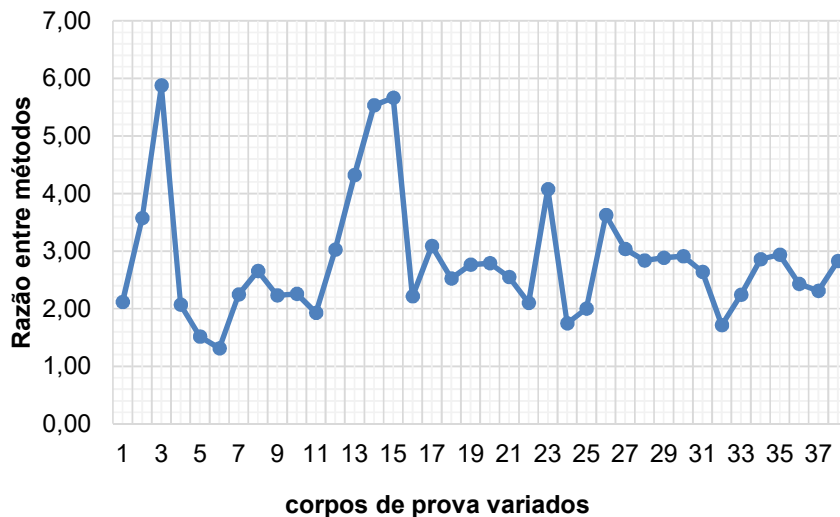
Figura 75: Gráfico de análise comparativa da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com CPII



Fonte: Autor (2017)

A razão entre os corpos de prova variados, sem controle laboratorial, pode-se observar uma variação muito grande entre algumas medições, principalmente entre a 4ª e 16ª amostra. (FIGURA 76)

Figura 76: Gráfico de análise comparativa da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com CP Variados

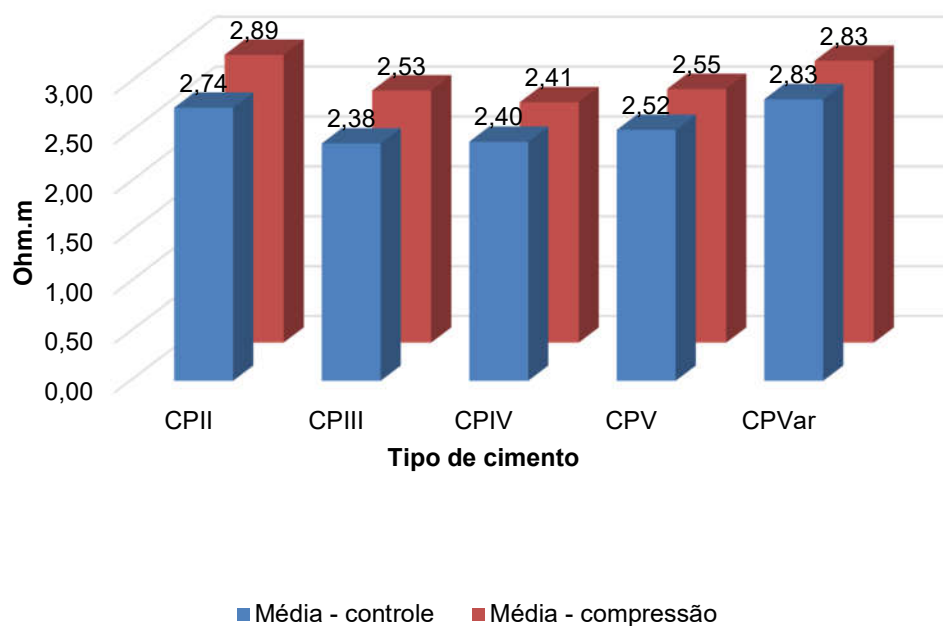


Fonte: Autor (2017)

Nas FIGURAS 77 e 78 foi realizada uma análise entre as médias das razões dos métodos de medição da resistividade elétrica do concreto. Pode-se observar um

valor bem próximo entre os vários tipos de cimento Portland de mesmo traço nas quatro primeiras barras. Porém a quinta barra é composta de corpos de prova sem saber a proveniência deles, interessante notar que mesmo assim esta também tem um valor aproximado com os demais.

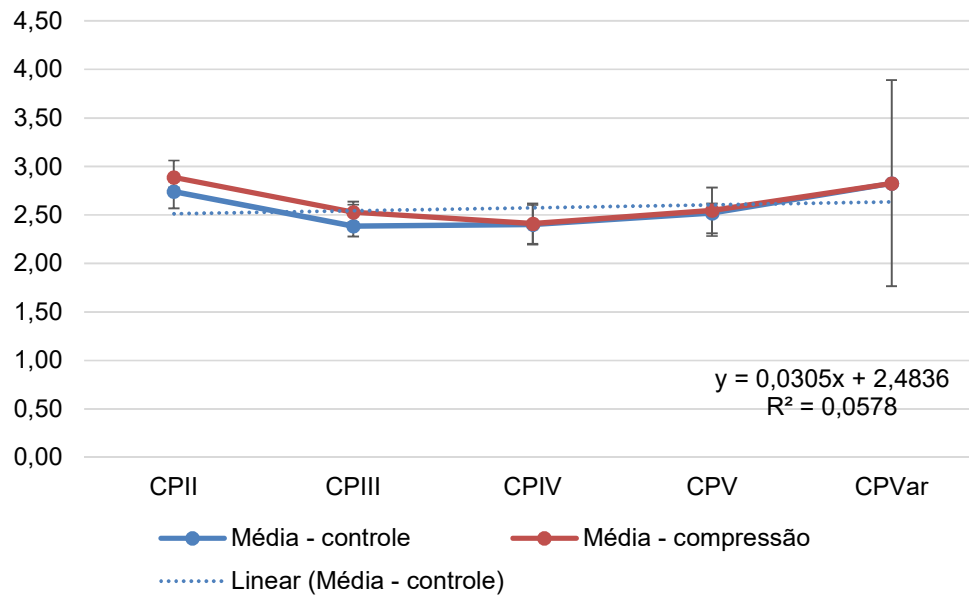
Figura 77: Gráfico de análise comparativa em barras da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com os diferentes tipos de cimento Portland



Fonte: Autor (2017)

A FIGURA 78 mostra em gráfico de linhas a relação do gráfico acima, porém ainda nos mostra o desvio padrão das amostras, podendo observar que o desvio padrão do CPVar é bem maior devido a diversificação das amostras.

Figura 78: Gráfico de análise comparativa da razão entre os métodos de resistividade elétrica confeccionados com os diferentes tipos de cimento Portland



Fonte: Autor (2017)

De acordo com Ghosh (2015) em seu artigo, o fator de correlação geométrica teórica entre os ensaios de resistividade elétrica superficial e volumétrica está entre 2.25 para 2.66. Este valor corresponde também a o valor proposto por Morris et al. (1996) para corpos de prova 100x200 mm que é de 2,63. Os ensaios realizados nesta dissertação encontram-se um valor médio para a relação bem aproximado com os acima, sendo que a média do fator de correção é de 2,61.

CONCLUSÕES

A resistividade elétrica pode ser um controle adicional para desempenho e durabilidade das estruturas de concreto armado, o método de ensaio pode ser utilizado na execução da obra e posteriormente como forma de controle de qualidade, podendo minimizar danos e estendendo a vida útil da peça estrutural. O monitoramento desde a confecção da peça e posterior pode ser um importante para avaliar a permeabilidade do concreto e evitar o desenvolvimento de corrosão devido à entrada cloreto ou carbonatação.

Os métodos analisados para avaliar a resistividade elétrica no concreto foram o método de quatro pontos, conhecido como método de Wenner, este sendo adequado ao uso para controle de qualidade do concreto em obras, e o método volumétrico dois pontos, sendo adequado ao uso em laboratório.

Comparando os métodos pode-se observar que o método superficial tem valores mais elevados que o método volumétrico. Entretanto, há uma correlação entre os valores, cujo aumento do valor é proporcional entre os métodos a partir da concretagem. Neste trabalho mediram-se vários tipos de cimento Portland até 100 dias após a concretagem, e os gráficos demonstram a evolução da superficial é proporcional a evolução da volumétrica. Assim pode-se buscar uma relação confiável entre os métodos de obtenção da resistividade elétrica do concreto.

Não foi possível, neste trabalho, fazer uma correlação entre a resistividade elétrica, tanto superficial como volumétrica, com módulo de elasticidade por frequência ressonante forçada e a resistência mecânica a compressão. Os dois métodos tem uma evolução diferente da resistividade elétrica até os 28 dias, como demonstrado nos gráficos. Além disso, após os 28 dias a resistividade elétrica tende a aumentar seu valor diferentemente do módulo e da resistência a compressão.

Os fatores envolvidos na medição da resistividade elétrica são muito importantes para se obter um resultado confiável. O controle da temperatura, a umidade do ar, o tipo de água utilizado, o contato entre a amostra e o eletrodo, a frequência que a fonte utiliza e o método de cura dos corpos de prova são parâmetros que

devem ser analisados e quantificados para realizar um ensaio padrão entres os métodos de medição dos corpos de prova.

O parâmetro frequência até 210 Hz não sofre uma variação significativa, porém é interessante definir valores adequados para a realização da medição. Para os tipos de água a serem utilizados a melhor escolha seria a água deionizada, porque ela gera uma menor influência na medição, porém em obra não teria como utilizar a água deionizada para saturar um pilar. Fica, então, uma questão sobre qual a água utilizada no processo de medição da resistividade elétrica, pois seu valor varia muito com tipo de água utilizada. O parâmetro em câmara úmida e submerso é uma questão interessante quando se analisa a rapidez na saturação. Os dois métodos chegam à saturação dos corpos de prova, porém o método submerso atinge a saturação bem mais rápido que em câmara úmida, como comprovado neste trabalho. O parâmetro contato entre o eletrodo e o corpo de prova foi analisado através dos ensaios para determinar o melhor contato. A lã de aço obteve um melhor desempenho de avaliação que os outros testados, porém não se descarta avaliar mais materiais para determinar um melhor contato.

Os parâmetros devem se melhor avaliados para os métodos de ensaios de resistividade elétrica do concreto, objetivando um denominador comum, com isso será possível obter-se ensaios mais eficazes, e portanto um método padronizado da determinação da resistividade elétrica do concreto.

PROPOSTAS FUTURAS

- Perda de massa durante a cura do concreto x resistividade elétrica -
 Analisar o efeito da perda de massa durante a cura do concreto na análise da resistividade elétrica.
- Saturação do corpo de prova x resistividade elétrica do concreto.
 - Verificar tempo de saturação do concreto.
 - Analisar e efeitos de tempo saturação x resistência.
 - Analisar e efeitos de corrosão x resistência.
 - Analisar efeito do preenchimento dos poros pela saturação.
 - Analisar variação de massa pelo tempo.
- Variação de frequência na resistividade elétrica do concreto –
 - Analisar o efeito da frequência acima de 500 Hz no ensaio de resistividade elétrica do concreto
- Influência das águas de diferentes locais para a resistividade elétrica do concreto.
 - Analisar a diferença de tipos de água de várias regiões do país.
 - Utilizar as águas de diferentes locais do planeta.
- Tamanho do corpo de prova.
 - Testar os diferentes tipos de corpos de prova na resistividade elétrica em seus formatos Cilíndrico e Prismático, variando o tamanho e fatia-los.
- Comparação Bulk Norma 9204/2012 com Bulk Werner da Proceq.
 - Conectar os dois modelos e ver se tem variação na resistividade elétrica.
- Pozolanicidade.

- Medir a pozolanicidade dos diferentes tipos de concretos CPI,II,III,IV,V + Sílica
- Influência da temperatura na resistividade elétrica do concreto.
 - Avaliar a influência da temperatura no ensaio de resistividade elétrica, tanto quanto ao meio quanto a temperatura da água.
- Influência da umidade do ar na resistividade elétrica do concreto.
 - Analisar o quanto a diferença de umidade influi na resistividade elétrica do concreto.
- Resistividade elétrica em Geopolímeros.
 - Avaliar se a resistividade elétrica do concreto geopolimérico é similar a do concreto convencional.
- Resistividade elétrica em concreto armado.
 - Analisar métodos mais eficazes na medição da resistividade elétrica em concretos armados.
- Avaliar resistividade elétrica do concreto - resistência x Tempo.
- Diferentes tipos de cura para a resistividade elétrica do concreto.
 - Ensaiar diferentes tipos de cura com submerso, câmara úmida, química e outras no ensaio de resistividade elétrica.
- Validar o aumento da resistividade elétrica com o aumento dos agregados.

REFERÊNCIA

AASHTO: TP 95. **Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.** 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 5732: **Cimento Portland comum.** Rio de Janeiro, 1991.

___.NBR 5733. **Cimento Portland com Alta Resistencia Inicial.** Rio de Janeiro, 1990.

___.NBR 5734. **Peneiras para ensaio com telas de tecido metálico.** Rio de Janeiro, 1989.

___.NBR 5735. **Cimento Portland de alto forno.** Rio de Janeiro, 1991.

___.NBR 5736. **Cimento Portland pozolânico.** Rio de Janeiro, 1991.

___.NBR 5737. **Cimentos Portland resistentes a sulfatos.** Rio de Janeiro, 1992.

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

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

___.NBR 6467 - **Agregados: determinação do inchamento do agregado miúdo, especificação.** Rio de Janeiro, 1987. 5 p.

___.NBR 6502. **Rochas e Solos.** Rio de Janeiro, 1995.

___.NBR 7211 - **Agregados para concreto, especificação.** Rio de Janeiro, 1982. 9p.

___.NBR 7217 - **Agregado: determinação da composição granulométrica, especificação.** Rio de Janeiro, 1987. 5 p.

___.NBR 7251 - **Agregado em estado solto: determinação da massa unitária, especificação.** Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

___.NBR 7810 - **Agregado em estado compactado a seco: determinação da massa unitária, especificação.** Rio de Janeiro, 1982. 3 p.

___.NBR 8953. **Concreto Para Fins Estruturais.** Rio de Janeiro, 2015.

___.NBR 9776 - **Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman, especificação.** Rio de Janeiro, 1986. 3 p.

___.NBR 9204/2012. **Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2012.

___NBR 11578. **Cimento Portland composto**. Rio de Janeiro, 1991.

___NBR 12655/2015 – **Concreto de cimento Portland – Preparo controle e recebimento - Procedimento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2015.

___NBR 12989. **Cimento Portland Branco**. Rio de Janeiro, 1992.

___NBR 13116. **Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação**. Rio de Janeiro, 1994.

___NBR 15900 2009 - **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2009.

___NM 248:2001. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2001.

___NM 26:2000. **Agregados - Amostragem / Agregados**. Rio de Janeiro, 2000.

ALMEIDA, Silvio Martins de. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. UFMG, Belo Horizonte, 2012.

ARAUJO A. de; PANOSSIAN Z.; OLIV K.r J.; FILHO M. L. P.. **Técnicas de medição da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional**. Técnica Educação, Edição 210 - Setembro/2014.

ASKLAND, Donald R., FULAY, Pradeep P., WRIGHT, Wendell j.. **The Science and Engineering of Materials**. Ed. Cengage Learning, Sixth edition. 2006.

FERREIRA, C, R,; TAVERES, S. S.; TEIXEIRA, R. L. P.; GOUVEIA, L. L. de A.; OLIVEIRA; C. A. de S.. **Accelerated corrosion test for the qualitative evaluation of corrosion in concrete**. Revista Construindo, Belo Horizonte, volume 08 número 02 jul/dez 2016

GHOSH, Pratanu, TRAN, Quang. **Correlation Between Bulk and Surface Resistivity of Concrete**. International Journal of Concrete Structures and Materials. Vol.9, No.1, pp.119–132, March 2015

HALLIDAY, David. **Fundamentos da Física: Eletromagnetismo**. Editora LTC, 4ª edição. Rio de Janeiro, 2010.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. **Concreto de Cimento Portland**. São Paulo. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais - IBRACON.2010

HOPPE, T. F.. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casaca de arroz**. Dissertação de mestrado. Santa Maria - RS, 2005.

ISAIA, G.C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. Editora IBRACON. São Paulo: IBRACON, 2007. 2 v.

KAEFER, Luís Fernando. **A Evolução do Concreto Armado**. São Paulo, PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – 1998.

LAYSSI, Hamed, Pouria Ghods, Aali R. Alizadeh, and Mustafa Salehi. **Electrical Resistivity of Concrete Concepts, applications, and measurement techniques_MAY** 2015.

LAGE, E.B.D, SIQUEIRA, P. G. F., MARTINS, P.H.A., AGUILAR, M.T.P., CHAHUD, E. **RESISTIVIDADE VOLUMÉTRICA DO CONCRETO: PARÂMETROS LABORATORIAIS**. Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto. Outubro-Novembro/2017.

LENCIONI, J. W., LIMA, M. G.. **Principais fatores intervenientes nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto – Estado-da-Arte**. VI Congresso internacional sobre patologias e reabilitação de estruturas, Sixth edition. Córdoba – Argentina. CINPAR 2010

LIU, Yanbo, SUAREZ, Andres*, PRESUEL-MORENO, Francisco J.. **Characterization of New and Old Concrete Structures Using Surface Resistivity Measurements**. Department of Transportation Research. Tallahassee, Florida. 2010.

LÜBECK A.; **Resistividade Elétrica de Concretos de Cimento Portland Branco e Elevados Teores de Escória de Alto Forno**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008, p.142.

MADHAVI, T. Ch., ANNAMALAI, S.. **Electrical conductivity of concrete**. India, ARPN Journals, Ninety edition. 2016, vol.11

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

NOKKEN, M. R., HOOTON, R. D.. **Electrical Conductivity Testing**. Ed. PCA R&D, No. 3002. 2006.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: Pini, 5ª edição. 2015. 828p

PEREIRA, V. C.de O.; ALMEIDA, K.; MONTEIRO, E. C. B.. **Avaliação da corrosão em argamassas de cimento portland utilizando a técnica de potencial de corrosão**. Revista Construindo, Belo Horizonte, volume 04 número 01 jan/jun 2012.

PESSÔA, J. R. de C.; DOMINGUÉZ, J. S.; CARVALHO, G. de; ASSIS, J. T. de. **Porosidade do Concreto Determinada por Microtomografia com Raio X e Processamento de Imagem**. Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, v. 14 - n. 2 - p. 20-26 - jul./dez. 2014.

POLDER R., with contributions from C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert and M. Raupac. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete**, rilem tc 154-emc: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 33, December 2000, pp 603-611

ROSA, A. R. O.; GONÇALVES, D. K. C.; OLIVEIRA, N. N. C.. **Avaliação da resistência à compressão do concreto usando raios-X**. Revista Construindo, Belo Horizonte, v.6, n. 1, p.19-25, 1 jan. 2014.

ROSA, D. W. de. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. Rio Grande do Sul, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

SANTOS, L.. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloreto em estruturas de concreto**. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil. Brasília, 2006.

SILVA, L. M. A.. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2016.

SONG, H., VELU, S.. **Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review**. Int. J. Electrochem. Sci., 2 (2007) 1- 28.

TORAYA, Juan de las Cuevas. **Un siglo de Cemento en Latinoamérica**, Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto – IMCYC, Mexico, 1999.

REFERÊNCIA ILUSTRATIVA

CINTRA, Milena Sampaio. **Marcas por Grupo e Área de Atuação**. Disponível em <http://cimento.org/marcas-por-grupo-e-atuacao/> acessado dia 08/08/2017. Data 2013.

MURUCCI, Rômulo. **Concreto Leve – parte 1**. Hospedado em: <HTTPS://BLOGDOPETCIVIL.COM/2015/05/25/CONCRETO-LEVE-PARTE-1/> . Acessado dia 15/02/2017.

MENDES, Mariane. **RESISTIVIDADE ELÉTRICA**. Hospedado <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/resistividade-eletrica.htm> ACESSADO DIA 15/02/2017. 20XX.

SILVA, Dominicano Correa Marques da. **Materiais condutores e isolantes..** Hospedado: <bhttp://alunosonline.uol.com.br/fisica/materiais-condutores-isolantes.html> . Acessado dia 15/02/2017. 20XX.