

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

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE BARRAS DE AÇO NA MEDIÇÃO DA
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

Autor: Darlan Ulhôa Leite

Orientador: Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte

Março/2019

Darlan Ulhôa Leite

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE BARRAS DE AÇO NA MEDIÇÃO DA
RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO**

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

Orientador(a): Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Coorientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2019

L533e	<p>Leite, Darlan Ulhôa. Estudo sobre a influência de barras de aço na medição da resistividade elétrica superficial do concreto [recurso eletrônico] / Darlan Ulhôa Leite. - 2019. 1 recurso online (xiv, 97 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Adriano de Paula e Silva. Coorientador: Aldo Giuntini de Magalhães.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndice: f. 82-97.</p> <p>Bibliografia: f. 77-81. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Construção civil - Teses. 2. Barras de aço - Teses. 3. Concreto - Teses. I. Silva, Adriano de Paula e. II. Magalhães, Aldo Giuntini de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p>
	CDU: 691 (043)

DARLAN ULHÔA LEITE

"ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE BARRAS DE AÇO NA MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO"

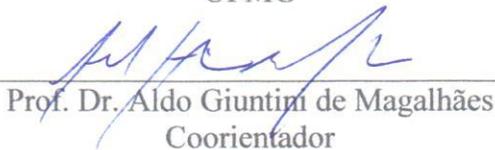
Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 22 de março de 2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
Orientador
UFMG



Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
Coorientador
UFMG



Prof. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar
UFMG



Prof. Dr. PÉTER LUDVIG
CEFET/MG

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço ao Pai Celestial por ter me dado a oportunidade de participar deste programa de mestrado e por todos os aprendizados obtidos neste período.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva, e meu coorientador, Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães, por todo o auxílio durante os trabalhos realizados e por todas as reuniões e conversas que foram extremamente importantes para a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus familiares e à minha namorada por todo o suporte e paciência durante o período do mestrado.

Agradeço ao meu sócio, Joel Chaves, pela compreensão nas faltas que tive no escritório para conclusão do mestrado e por todo apoio e suporte, ao longo de toda essa jornada.

Agradeço à Martins Lanna, Lafarge Holcim, Mc Bauchemie e Arcelor Mittal pelos materiais fornecidos, à Pi Engenharia, por informações e suporte em relação ao tema, além do empréstimo de um equipamento, à TopMix pela realização de parte dos testes de caracterização do concreto auto adensável e à Viatest, na pessoa do engenheiro Raul, que auxiliou nos testes realizados no trabalho.

Por fim, agradeço a todos os demais professores e colegas do DEMC, em especial a Profa. Maria Teresa Paulino Aguiar, Prof. Luiz Antônio Melgaço Nunes Branco, Prof. Eduardo Chahud e a colega Letícia Couto de Aguiar, que foram importantes para o meu crescimento acadêmico e para o desenvolvimento deste estudo.

RESUMO

O desenvolvimento de técnicas envolvendo ensaios não destrutivos, para caracterização e determinação da qualidade do sistema (concreto armado), possui um papel importante para a engenharia diagnóstica na construção civil. Uma das características importantes do concreto, para determinar sua durabilidade, é a resistividade elétrica superficial do concreto, visto que esta característica encontra-se diretamente relacionada com a possibilidade de ataques de agentes agressivos ao concreto. Verificou-se que os métodos de determinação da resistividade elétrica superficial do concreto utilizam corrente elétrica, e são realizados em estruturas de concreto armado, portanto, apresentam barras de aço. Diversos pesquisadores estudaram a presença do aço em corpos de prova, identificando que há influência das barras na medição. Este estudo foi realizado com o objetivo de analisar a influência das barras de aço nas medições de resistividade elétrica superficial do concreto. Foram confeccionados 12 corpos de prova, sendo oito com barras de aço (malha de quatro barras) e quatro sem barras de aço (referência). Metade dos corpos de prova foi produzida com cimento CP-V-ARI e a outra metade com cimento CP-IV-32-RS. Foram realizadas medições em diversas configurações (posições do aparelho) nas placas. Foi identificado que, os corpos de prova produzidos com CP-IV-32-RS apresentaram valores de resistividade elétrica superficial superiores aos corpos de prova confeccionados com CP-V-ARI, provavelmente devido à presença da pozolona que reduz a permeabilidade do concreto. Identificou-se ainda que, as configurações nos corpos de prova com barras que apresentam medições mais próximas das de referência (sem barras) são as perpendiculares às barras com o aparelho no centro das barras. Verificou-se que, quanto mais vergalhões próximos aos eletrodos das extremidades do aparelho utilizado, maior será o impacto do aço, ou seja, mais corrente passará pelas barras e menos corrente passará pelo concreto, conseqüentemente, menor será a diferença de potencial medida nos eletrodos centrais e menor a resistividade elétrica superficial.

Palavras-Chave: Resistividade elétrica superficial, método Wenner, barras de aço.

ABSTRACT

The development of non-destructive tests for characterization and determination of concrete quality has an important role on diagnostic engineering in civil construction. One of the important characteristics of concrete to determine its durability is the surface electrical resistivity of the concrete, since this characteristic is directly related to the possibility of attacks of aggressive agents to the concrete. It was verified that the methods used to determine the surface electrical resistivity of the concrete use electric current for the determination of this parameter, and are used in reinforced concrete structures, therefore, they present steel bars. For this reason, this study was carried out with the objective of analyzing the influence of steel bars on the measurements of surface electrical resistivity of concrete. Twelve specimens were cast, eight with steel bars (four bars) and four without steel bars (reference). Half of the specimens were cast with CP-V-ARI cement and the other half with CP-IV-32-RS cement. Measurements were made in various configurations (device positions) on the plates. It was identified that the samples produced with CP-IV-32-RS presented higher electrical resistivity values than the specimens produced with CP-V-ARI probably due to the presence of pozzolana that reduces the permeability of the concrete and consequently increases the surface electrical resistivity. It was also identified that the configurations in the specimens with bars that have measurements closer to the reference ones (without bars) are those perpendicular to the bars with the apparatus in the center of the bars. It was verified that the more bars near the end electrodes of the device used (Resipod-Proceq), the greater the impact of these bars, that is, more current will pass through the bars and less current will pass through the concrete, consequently, the smaller the difference of potential measured in the central electrodes and lower the superficial electrical resistivity.

Key words: Surface electrical resistivity, Wenner method, rebars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de resistividade elétrica do concreto:	2
Figura 2 - Instruções para realizar as medições de resistividade elétrica superficial, em presença de armaduras	8
Figura 3 – Instruções para realizar as medições de resistividade elétrica superficial, dentro de uma malha de aço	9
Figura 4 - Dimensões das lajes, diâmetro das barras e da camada de cobrimento dos corpos de prova	9
Figura 5 - Esquema do experimento realizado, esclarecendo o procedimento adotado ..	10
Figura 6 - Esquema do experimento realizado, esclarecendo a localização do aparelho de medição e das barras.....	10
Figura 7 – Resultado do software COMSOL Multiphases, indicando que quando há presença de barras metálicas (armaduras) no concreto, a tendência é que a corrente aplicada se concentre mais na barra metálica do que no concreto.....	11
Figura 8 - Gráfico comparativo entre os valores de resistividade de corpos de prova com e sem barra.....	12
Figura 9 - Resultado do Software “COMSOL Multiphysics finite element”. Verifica-se que a corrente, linhas vermelhas, é direcionada para as barras, fato que mascara o cálculo da resistividade elétrica do concreto	14
Figura 10 - Imagem representando a localização das barras, sendo T=camada de cobrimento, \varnothing = diâmetro da barra, S= espaçamento entre barras paralelas na mesma direção. Verifica-se que, as barras verdes encontram-se abaixo das barras azuis, tomando-se como base a face superior da laje	16
Figura 11 - Imagem representando as diferentes configurações de posicionamento dos eletrodos, em comparação com as barras de aço, nos testes realizados.	16
Figura 12 - Representação das dimensões dos corpos de prova utilizados na modelagem em elementos finitos	18
Figura 13 - Representação da localização das medições realizadas nos corpos de prova com uma barra	19
Figura 14 - Representação da localização das medições realizadas nos corpos de prova com quatro barras	19
Figura 15 – Representação das medidas dos corpos de prova com uma barra.	21
Figura 16 - Representação da localização das medições realizadas nos corpos de prova com uma barra	22

Figura 17 - Resultados sobre a influência da umidade na resistividade das vigas ensaiadas.....	24
Figura 18 – Resultados sobre a influência das barras nas medições	25
Figura 19 - Ilustração do corpo de prova elaborado e da posição dos eletrodos nas medições.....	25
Figura 20 – Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental realizado.....	32
Figura 21 – Ensaio físicos do cimento Portland CP V - ARI - Fácil.	33
Figura 22 – Análise química do cimento Portland CP V - ARI - Fácil.....	34
Figura 23 – Ensaio físicos do cimento Portland CP IV-32-RS.....	34
Figura 24 – Análise química do cimento Portland CP IV-32-RS	35
Figura 25 – Evolução da resistividade elétrica de diferentes tipos de cimento, para relação $a/c = 0,50$	36
Figura 26 – Curva granulométrica da areia utilizada no estudo.	37
Figura 27 – Curva granulométrica da brita utilizada no estudo.	38
Figura 28 - Informações sobre o aparelho utilizado no estudo	40
Figura 29 – Imagem ilustrativa da distribuição dos corpos de prova confeccionados.	42
Figura 30 – Imagem ilustrativa das dimensões dos corpos de prova confeccionados (valores em mm).	42
Figura 31 – Imagem ilustrativa das dimensões dos corpos de prova confeccionados (valores em mm).	43
Figura 32 – Gabarito para moldagem dos corpos de prova.....	45
Figura 33 – Imagem aproximada do gabarito para moldagem dos corpos de prova.....	46
Figura 34 – Detalhe do espaçador e do plástico utilizado na moldagem dos corpos de prova.....	46
Figura 35 – Local onde os corpos de prova foram armazenados	47
Figura 36 – Configurações (posicionamentos) analisados em cada face dos corpos de prova. As configurações #13, #14, #15 e #16 foram realizadas sobre as barras de aço, portanto, as setas existentes na figura indicam a localização do aparelho.	48
Figura 37 – Aferição das camadas de cobrimento executadas.....	49
Figura 38 – Cobrimentos das face inferiores (inf) e superiores (sup) dos corpos de prova confeccionados com cimento CP-V-ARI.....	50
Figura 39 – Cobrimentos das face inferiores (inf) e superiores (sup) dos corpos de prova confeccionados com cimento CP-IV-32-RS.....	50
Figura 40 – Gráfico da variação da resistividade elétrica superficial do concreto ao longo do tempo (para as configurações #4, #8 e #9 da Figura 36).....	52

Figura 41 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 7º dia, após a concretagem.	53
Figura 42 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 28º dia, após a concretagem.	54
Figura 43 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 56º dia, após a concretagem.	54
Figura 44 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 91º dia, após a concretagem.	55
Figura 45 – Esquema elucidativo da obtenção do coeficiente de equivalência.	56
Figura 46 – Esquema elucidativo das posições 1 e 2 das medições realizadas sobre as barras (configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36).	57
Figura 47 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #1 e #5 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	59
Figura 48 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #2 e #6 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	60
Figura 49 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #3 e #7 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	62
Figura 50 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #4 e #8 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	63
Figura 51 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #9 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	64
Figura 52 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #10 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	65
Figura 53 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #11 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	66
Figura 54 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #12 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.	67
Figura 56 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 1 da Figura 46, considerando todas as idades ensaiadas.	69

Figura 56 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 2 da Figura 46, considerando todas as idades ensaiadas. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros analisados.....	17
Tabela 2 - Informações sobre o concreto utilizado	20
Tabela 3 - Representação do programa de teste	21
Tabela 4 - Resultados dos testes realizados no corpo de prova prismático de 12x12x11cm.....	26
Tabela 5 – Resumo de outros artigos analisados com indicação das normas referenciadas nos trabalhos.	28
Tabela 6 – Valores de referência para resistividade elétrica do concreto	30
Tabela 7 – Valores de referência para resistividade elétrica do concreto	30
Tabela 8 – Valores de referência para a resistividade elétrica do concreto	30
Tabela 9 - Valores de referência para a resistividade elétrica do concreto	31
Tabela 10 - Valores de referência para a resistividade elétrica do concreto	31
Tabela 11 – Resultados dos testes de caracterização realizadas para a areia utilizada. .	36
Tabela 12 – Resultados dos testes de caracterização realizadas para a brita utilizada. .	38
Tabela 13 – Parâmetros do traço utilizado no estudo.....	41
Tabela 14 – Cobrimentos analisados.	44
Tabela 15 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #1 e #5 da Figura 36.....	58
Tabela 16 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #1 e #5 da Figura 36.....	58
Tabela 17 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #2 e #6 da Figura 36.....	59
Tabela 18 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #2 e #6 da Figura 36.....	60
Tabela 19 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #3 e #7 da Figura 36.....	61
Tabela 20 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #3 e #7 da Figura 36.....	61
Tabela 21 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #4 e #8 da Figura 36.....	62
Tabela 22 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #4 e #8 da Figura 36.....	63
Tabela 23 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #9 da Figura 36.	64

Tabela 24 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #9 da Figura 36.	64
Tabela 25 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #10 da Figura 36.	65
Tabela 26 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #10 da Figura 36.	65
Tabela 27 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #11 da Figura 36.	66
Tabela 28 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #11 da Figura 36.	66
Tabela 29 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #12 da Figura 36.	67
Tabela 30 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #12 da Figura 36.	67
Tabela 31 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 1 da Figura 46.	68
Tabela 32 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 1 da Figura 46.	68
Tabela 33 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 2 da Figura 46.	69
Tabela 34 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 2 da Figura 46.	70
Tabela 35 – Coeficientes de equivalência, para as cobrimentos 24 e 41mm.	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVOS GERAIS	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 POROSIDADE	5
3.2 UMIDADE.....	5
3.3 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO	6
3.4 TIPO DE CIMENTO	6
3.5 AGREGADO RECICLADO	7
3.6 CARBONATAÇÃO.....	7
3.7 PRESENÇA DE BARRAS DE AÇO	7
3.8 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO.....	26
3.8.1 Normas Técnicas	27
3.8.2 Outros artigos	28
3.9 VALORES DE REFERÊNCIA	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	32
4.1.1 Cimento.....	33
4.1.2 Agregado miúdo.....	36
4.1.3 Agregado graúdo.....	37
4.1.4 Água	39
4.1.5 Aditivo	39
4.1.6 Aço	39
4.1.7 Aparelho medidor de resistividade elétrica superficial	39
4.2 DOSAGEM DOS TRAÇOS.....	40
4.3 DIMENSÕES DOS CORPOS DE PROVA	41
4.4 MOLDAGEM E CURA DOS CORPOS DE PROVA	45
4.5 MEDIÇÕES REALIZADAS NOS CORPOS DE PROVA	48
5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
5.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO X TEMPO (CORPOS DE PROVA DE REFERÊNCIA)	52
5.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO X POSIÇÃO DO APARELHO (CORPOS DE PROVA DE REFERÊNCIA).....	53
5.3 INFLUÊNCIA DAS BARRAS NAS MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO	55
5.3.1 Influência das barras e da posição do equipamento nos coeficientes de equivalência, ao longo do tempo.....	57

5.3.2 Análise da influência das barras e da posição do equipamento nos coeficientes de equivalência, ao longo do tempo	71
6 CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
APÊNDICE	82

1 INTRODUÇÃO

As estruturas construídas em concreto armado frequentemente são afetadas por manifestações patológicas, devido à ação de agentes agressivos ao concreto. Estas manifestações podem possuir diversas causas, dentre elas, a execução de um concreto com características que permitam a penetração destes agentes agressivos, provocando, dentre outros fatores, a corrosão das armaduras.

A corrosão do aço presente no concreto, normalmente ocorre como um resultado da presença de grandes quantidades de íons cloretos ou devido à redução da alcalinidade, por meio da carbonatação (BASHEER *et al.*, 2002). O ataque das armaduras do concreto pode provocar danos estruturais em uma edificação, repercutindo em gastos excessivos para a realização de medidas corretivas na recuperação das estruturas.

A durabilidade do concreto está relacionada com os tipos de materiais utilizados, os limites admissíveis para substâncias agressivas ao concreto, as características das trincas e o cobrimento das armaduras (ANDRADE, 2004). Entretanto, há uma necessidade de estabelecer padrões mais avançados relacionados à durabilidade do concreto.

O desenvolvimento de técnicas envolvendo ensaios não destrutivos, para caracterização e determinação da qualidade do concreto, possui um papel importante para a engenharia diagnóstica na construção civil. Estes ensaios permitem obter informações importantes sobre o concreto utilizado nas edificações, de modo que possam ser tomadas as medidas necessárias, para uma eventual necessidade de recuperação estrutural, realizações de manutenções corretivas ou preventivas, bem como caracterizarem-se como métodos de monitoramento da qualidade do concreto executado.

Uma das características importantes do concreto, para determinar sua durabilidade, é a qualidade da camada de cobrimento das armaduras, visto que esta camada encontra-se diretamente relacionada com a possibilidade de ataques

de agentes agressivos ao concreto armado. Dentre os ensaios não destrutivos, que permitem obter informações sobre a camada de cobrimento das armaduras, pode-se destacar o ensaio de resistividade elétrica superficial do concreto. Este ensaio é influenciado por diversos fatores, tais como, mas sem se limitar, ao tipo de cimento, aditivos, adições minerais, temperatura, carbonatação, umidade do corpo de prova e presença de armaduras.

A relação entre a resistividade do concreto e a taxa de corrosão consequentemente possibilitaria a avaliação do estado de corrosão de estruturas em concreto armado de forma eficiente e economicamente viável (HORNBOSTEL, LARSEN e GEIKER, 2013). Em relação à importância da resistividade elétrica do concreto, é possível informar que, em estruturas de concreto armado, no início de corrosão das barras, a corrente e a taxa de corrosão, são influenciadas pela resistividade elétrica do concreto (HOSSAIN e LACHEMI, 2004).

Os métodos para aferição da resistividade elétrica do concreto, podem ser comparados a circuitos elétricos que permitem realizar as medições deste parâmetro. Normalmente, a conexão entre o concreto e o circuito é feita por meio de eletrodos de metal (LAYSSI *et al.*, 2015). Neste contexto, podem ser destacados dois tipos de métodos: método de dois eletrodos – uniaxial e método de quatro eletrodos, os quais estão ilustrados na Figura 1.

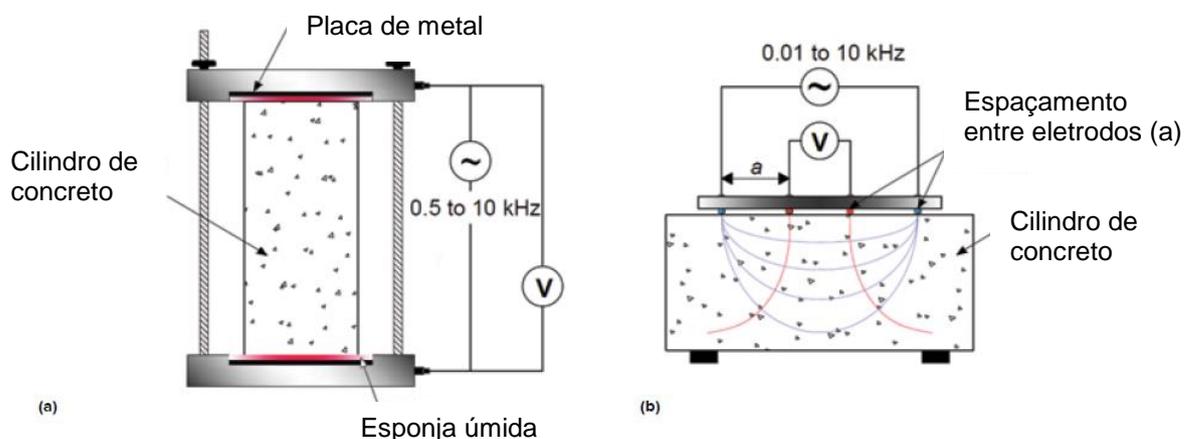


Figura 1 - Métodos de resistividade elétrica do concreto:

- a) método de dois eletrodos
- b) método de quatro eletrodos

Fonte: Adaptado de Layssi *et al.*, 2015.

O método de dois eletrodos – uniaxial, mede a resistividade elétrica das áreas internas do concreto, enquanto o método de quatro eletrodos, mede a resistividade elétrica das áreas externas do concreto (camada de revestimento). Portanto, considera-se que o método de dois eletrodos mede a resistividade elétrica volumétrica do concreto e o método de quatro eletrodos mede a resistividade elétrica superficial do concreto.

O equipamento a ser utilizado no estudo será o Resipod – Proceq, o qual possui quatro eletrodos (método dos quatro eletrodos – Wenner). Neste método, quatro eletrodos são colocados em contato com o concreto, equidistantes e alinhados. Nos eletrodos externos passa uma pequena corrente alternada e mede-se a diferença de potencial entre os eletrodos internos (PÉREZ, 2015).

Este método (quatro eletrodos) é utilizado há muito tempo, mas sempre evitou-se a sua utilização próxima a barras metálicas (armaduras), tendo em vista que quando a barra encontra-se próximo da zona de influência da corrente aplicada, a resistividade será camuflada e não representará a resistividade do concreto (GARZON *et al.*, 2014).

O método de quatro eletrodos (resistividade elétrica superficial), é um teste não destrutivo que foi idealizado para utilizações em campo. Considerando que a maioria ou totalidade das estruturas que utilizam concreto são elementos estruturais que também utilizam o aço, é de extrema importância conhecer, entender e saber interpretar a influência das armaduras nas medições de resistividade elétrica superficial do concreto.

Sendo assim, este trabalho contribuirá para o estudo da resistividade elétrica superficial do concreto, e nos itens seguintes serão apresentados: objetivos (item 2), revisão bibliográfica (item 3), materiais e métodos (item 4), apresentação e análise dos resultados (item 5) e conclusões (item 6).

2 OBJETIVOS

Neste item serão apresentados os objetivos gerais e específicos do trabalho realizado, conforme abaixo.

2.1 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho é avaliar de forma experimental, a influência das barras de aço nas medições de resistividade elétrica superficial do concreto.

2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos podem ser citados os seguintes:

- Avaliar a presença da barra;
- Avaliar a influência do tipo de cimento (CP-V-ARI e CP-IV-32-RS) na resistividade elétrica superficial do concreto ao longo do tempo;
- Avaliar a influência da presença de barras na resistividade elétrica superficial do concreto, em função do posicionamento do equipamento de medição;
- Avaliar o impacto da espessura da camada de cobrimento na resistividade elétrica superficial do concreto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A resistividade do concreto é uma propriedade do material que descreve sua resistência elétrica, que é a proporção entre a voltagem aplicada e a corrente resultante (POLDER, 2001). Devido à resistividade sofrer influência de diversos fatores, este item apresentará estudos que tratam das influências de diversos parâmetros na medição da resistividade elétrica do concreto.

3.1 Porosidade

A ideia principal da maioria dos ensaios de resistividade elétrica é de quantificar as propriedades condutivas da microestrutura do concreto. Sendo que estruturas com redes de poros finos e com menor conectividade, apresentam baixa permeabilidade, enquanto estruturas porosas com maior conectividade entre os poros, apresentam alta permeabilidade e, conseqüentemente, menor durabilidade (LAYSSI *et al.*, 2015).

A resistividade elétrica do concreto pode ser descrita como a habilidade do concreto em suportar a transferência de íons, submetidos a um campo elétrico. Neste contexto, a resistividade elétrica do concreto pode ser utilizada para avaliar o tamanho e a extensão da interconectividade dos poros (LAYSSI *et al.*, 2015).

3.2 Umidade

O aumento da condutividade elétrica do concreto nas idades iniciais de hidratação decorre do aumento da concentração iônica e da mobilidade destes íons nas idades iniciais. Nesta fase a água presente nos poros torna-se saturada com íons Ca^{++} e OH^- , além de outros íons derivados da hidratação dos grãos de cimento, tais como: SO_4^- , Na^+ e K^+ (EL-ENEIN *et al.*, 1995).

A resistividade elétrica controla o fluxo de íons no concreto através da solução aquosa presente nos poros, sendo altamente sensível ao teor de umidade de equilíbrio e à temperatura do concreto (HELENE, 1993). Quanto maior a

saturação dos poros e quantidade de poros com maiores diâmetros, menor será a resistividade (POLDER e PEELEN, 2002).

3.3 Relação água/cimento

A relação água/cimento do concreto influencia consideravelmente a estrutura porosa da pasta de cimento. Quanto maior a relação água/cimento, maior o volume de poros e maior a probabilidade de existirem poros com maiores diâmetros e interconectados e, portanto, menor a resistividade (SANTOS, 2006).

Devido ao fluxo de corrente elétrica no concreto ser um processo eletrolítico, um aumento na atividade iônica causa a redução da resistividade elétrica. Portanto, altas relações água/cimento, altos percentuais de saturação do concreto e altas concentrações de sais dissolvidos nos poros geram redução da resistividade elétrica (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

3.4 Tipo de cimento

A presença de escória de alto forno e/ou com cinzas volantes no cimento influencia nos valores de resistividade elétrica do concreto. Concretos produzidos com cimentos com altos percentuais de escória de alto forno e/ou com cinzas volantes apresentam valores de resistividade elétrica do concreto maiores do que os concretos produzidos com cimento Portland, que não possuem escória de alto forno ou cinzas volantes (POLDER e PEELEN, 2002).

Hossain e Lachemi (2004), concluíram que, há uma relação inversamente proporcional entre o volume total de poros existentes na mistura e os valores de resistividade elétrica do concreto, em uma escala logarítmica. Os autores concluíram ainda que, quando há substituição do cimento por cinzas vulcânicas (20% e 40% - utilizadas no referido artigo), há aumento da resistividade elétrica do concreto em comparação com a mistura sem substituição.

3.5 Agregado reciclado

Singh e Singh (2016) realizaram um estudo sobre a substituição de agregado graúdo por agregado reciclado de concreto. A conclusão do referido trabalho é de que, há aumento da probabilidade de ocorrência de corrosão quando ocorre o aumento de substituição de agregado natural pelo agregado reciclado de concreto utilizado no referido estudo.

3.6 Carbonatação

Chi, Huang e Yang (2002) apresentaram um estudo indicando que, o aumento da carbonatação provoca o aumento da resistividade do concreto. Este fator pode ser explicado devido à expansão dos sólidos nos poros, reduzindo a porosidade do concreto e, conseqüentemente, aumentando a sua resistividade.

3.7 Presença de barras de aço

Segundo as instruções de operação do aparelho utilizado: *“A presença de vergalhões interfere nas medições de resistividade elétrica, já que são muito melhores condutores de corrente do que o concreto no entorno. Isso é particularmente o caso quando a espessura de camada de concreto for inferior a 30 mm. Sempre que possível, os vergalhões não devem estar diretamente abaixo da sonda e não devem correr paralelamente a ela. A orientação de medição recomendada é determinada pelo espaçamento dos vergalhões comparada com o espaçamento das sondas.”* (PROCEQ, 2017)

O referido documento apresenta ainda as informações constantes na Figura 2:

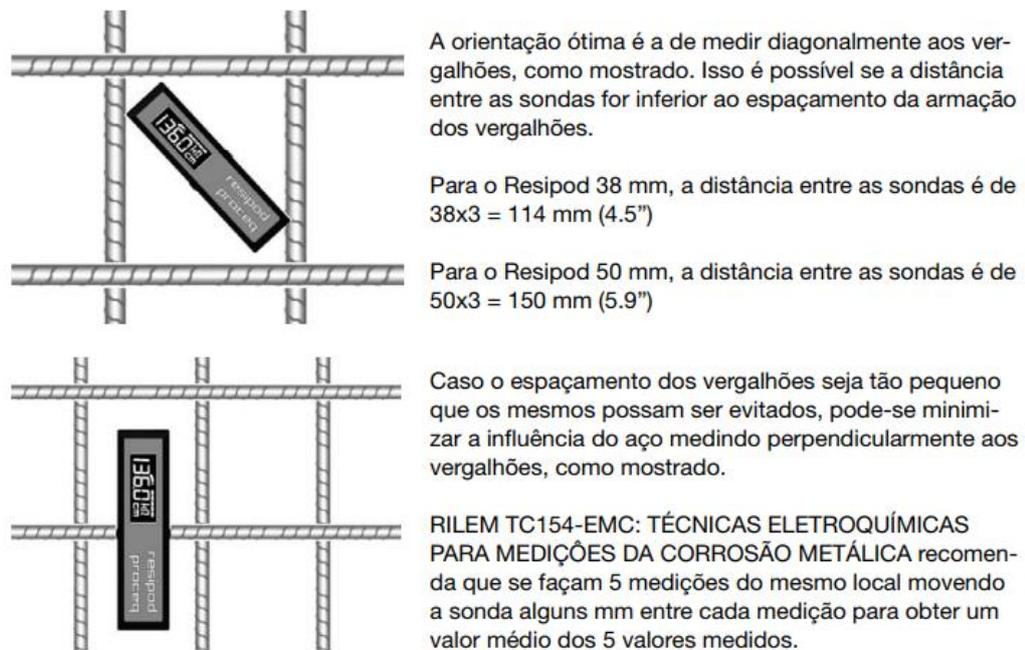


Figura 2 - Instruções para realizar as medições de resistividade elétrica superficial, em presença de armaduras
 Fonte: Instruções de Operação do Resipod (2017).

Polder (2001), apresentou as seguintes recomendações para a realização das medições de resistividade elétrica do concreto, quando utilizado o método de quatro eletrodos (o qual será utilizado neste trabalho):

- O concreto deve estar limpo e livre de contaminações, como óleo.
- Antes das medições o concreto deve ser umedecido levemente para aumentar o contato com os eletrodos.
- Devido à temperatura apresentar efeito significativo, é recomendado evitar ambientes muito quentes ou muito frios.

Em relação ao método de quatro eletrodos, deve-se:

- Localizar as barras e marca-las;
- Realizar a medição o mais afastado possível das barras, de forma diagonal, dentro da malha de aço, e realizar cinco leituras na mesma posição, movendo alguns mm entre as medidas (conforme apresentado na Figura 3);
- Utilizar a mediana das medidas.

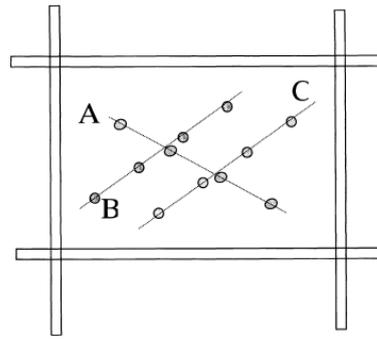


Figura 3 – Instruções para realizar as medições de resistividade elétrica superficial, dentro de uma malha de aço
 Fonte: Polder (2001).

As recomendações de Polder (2001) representam diretrizes para uma metodologia de medição de resistividade elétrica superficial. Entretanto, não detalha o que seria um ambiente muito quente ou muito frio e não esclarecer como deve ser o umedecimento do concreto. A ausência destas informações não permite identificar a metodologia detalhada apresentada pelo autor.

Nguyen *et al.* (2017) fizeram um experimento em três lajes com largura de 25 cm, comprimento de 50 cm e altura de 12 cm, utilizaram barras de aço com bitola de 10 mm, e cobrimentos de 2 cm ou 4 cm, posicionadas a 7,5 cm das laterais conforme Figura 4.

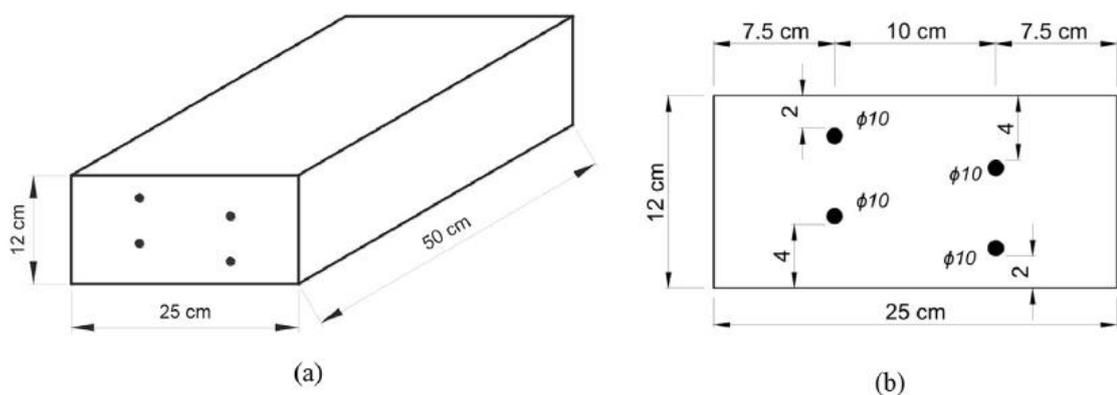


Figura 4 - Dimensões das lajes, diâmetro das barras e da camada de cobertura dos corpos de prova
 Fonte: Nguyen *et al.* (2017).

Neste experimento foi utilizado um fator a/c de 0,71, com a finalidade de obter um concreto poroso. Para atingir o estado de máxima saturação foi realizada a medição do peso das lajes até que parasse de aumentar, indicando a saturação total do concreto. Foi utilizado resina nas laterais para que a água somente variasse verticalmente. Posteriormente, as lajes foram posicionadas em tanques com água de modo que uma das superfícies somente tocasse na água, proporcionando um ambiente sempre úmido, enquanto a outra face ficou exposta ao ambiente, conforme imagem abaixo.

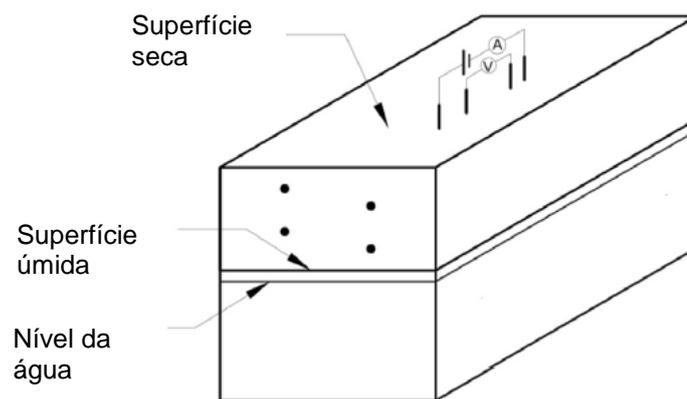


Figura 5 - Esquema do experimento realizado, esclarecendo o procedimento adotado
Fonte: Adaptado de Nguyen *et al.* (2017).

Das três lajes, somente duas foram ensaiadas, uma com as barras e outra sem as barras, nas posições indicadas abaixo.

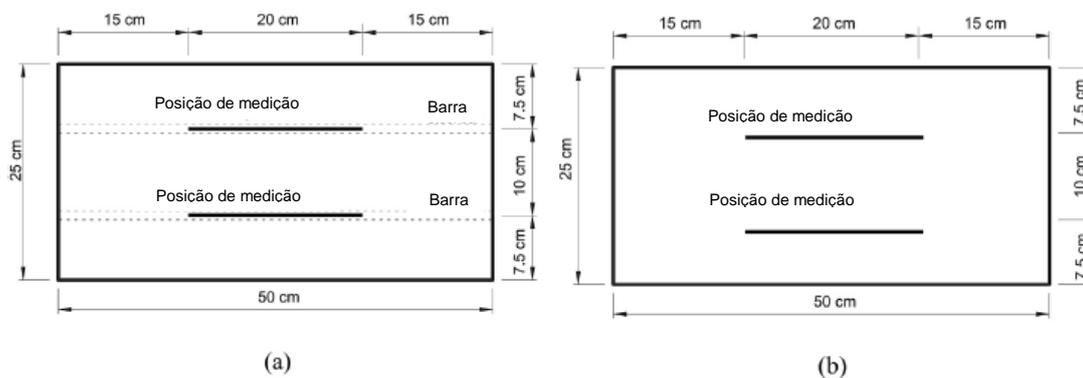


Figura 6 - Esquema do experimento realizado, esclarecendo a localização do aparelho de medição e das barras
Fonte: Adaptado de Nguyen *et al.* (2017).

Como resultado, houve uma redução no valor da resistividade, quando a medição é realizada sobre barras de aço. Esta redução pode ser explicada devido ao metal ser um condutor elétrico e, portanto, em face da sua condutividade elétrica, é criada uma rota preferencial para a corrente, na barra de aço, que conseqüentemente reduz a medição da resistividade elétrica do concreto (NGUYEN *et al.*, 2017).

Uma das conclusões deste artigo foi de que a medida de resistividade elétrica do concreto pode ser utilizada para determinar a presença de barras por meio da análise da redução da resistividade medida. Quanto mais próxima estiver a barra da camada superficial do concreto, maior será a redução da resistividade.

Garzon *et al.* (2014), realizaram uma modelagem em elementos finitos, considerando o método de quatro eletrodos, em prismas e cilindros com e sem a presença de barras, pela utilização do software COMSOL Multiphases, obtendo os resultados da Figura 7:

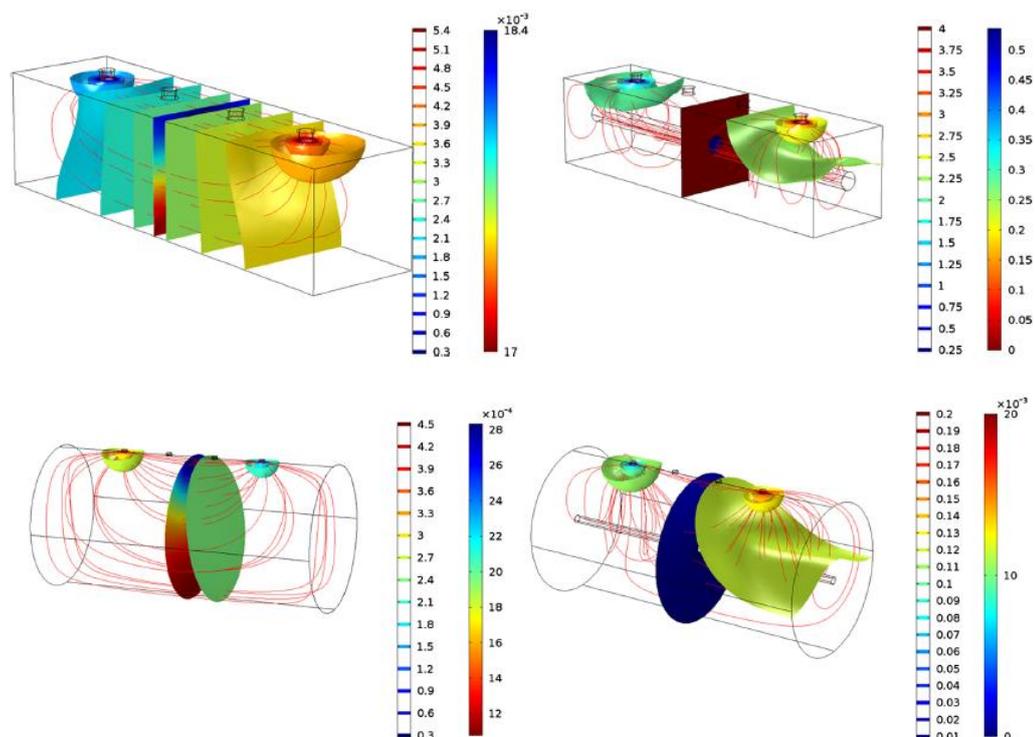


Figura 7 – Resultado do software COMSOL Multiphases, indicando que quando há presença de barras metálicas (armaduras) no concreto, a tendência é que a corrente aplicada se concentre mais na barra metálica do que no concreto
Fonte: Garzon *et al.* (2014).

Os dados teóricos deste estudo mostraram que a resistividade aparente é relativamente menor com a presença de barras metálicas, do que quando elas estão ausentes. Este fato indica a necessidade de introduzir alguns fatores para obter a resistividade real (GARZON *et al.*, 2014).

Também houve a realização de trabalhos experimentais no referido artigo, utilizando corpos de prova cilíndricos de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura, bem como chapas prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm, com e sem barras de aço (8mm de diâmetro). O traço identificado foi de 1:3 (cimento e areia) e uma relação água/cimento de 0,50.

Os resultados indicam que, para resistividades muito baixas, os valores experimentais são similares de corpos de prova com e sem barras. Entretanto, quando a resistividade começa a aumentar, os valores começam a ficar bastante divergentes, principalmente acima de 50 $\Omega.m$, conforme mostra a Figura 8. Verifica-se ainda que, apesar do aumento da resistividade elétrica nos corpos de prova sem barras, não há aumento da resistividade dos corpos de prova com barras.

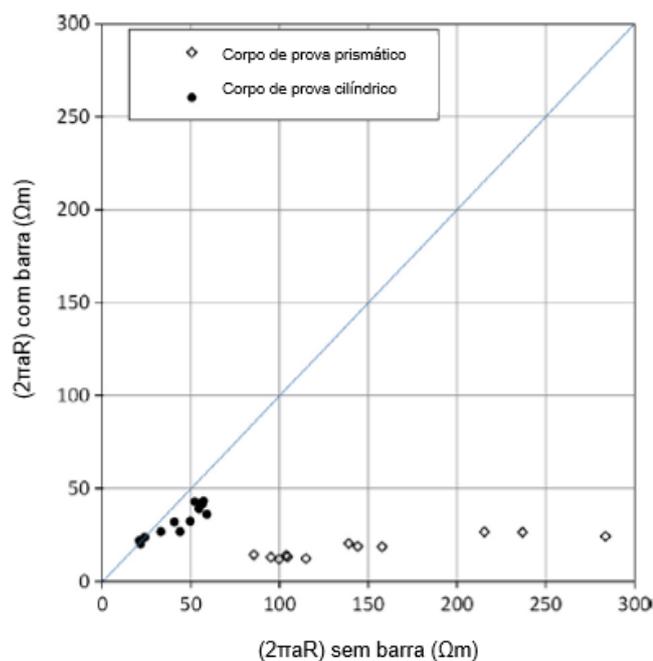


Figura 8 - Gráfico comparativo entre os valores de resistividade de corpos de prova com e sem barra

Fonte: Adaptado de Garzon *et al.* (2014).

Os resultados experimentais apresentados revelam a importância da influência das barras de aço na medição da resistividade elétrica do concreto. É possível verificar pela Figura 8 que, embora a resistividade elétrica do concreto apresente valores crescentes (sem barra), os corpos de prova com barra não retratam estes valores crescentes, informando valores incorretos da resistividade elétrica do concreto.

Garzon *et al.* (2012) apresentaram de forma simplificada, utilizando o software “COMSOL Multiphysics finite element”, simulando corpos de prova prismáticos e cilíndricos, com e sem a presença de barras e desenvolveram equações para os fatores “forma” e “barra” em função do espaçamento entre eletrodos (a), para os corpos de prova prismáticos (Equações 1 e 2) e cilíndricos (Equações 3 e 4).

Somente fator forma (f_s):

$$f_s = -25,006 \times a + 1,0472 \text{ (Eq. 1)}$$

$$f_s = -8,5074 \times a + 1,0282 \text{ (Eq. 2)}$$

Fator forma (f_s) e fator barra (f_b):

$$f_b f_s = -36,117 \times a + 0,5945 \text{ (Eq. 3)}$$

$$f_b f_s = -3,3636 \times a + 0,9618 \text{ (Eq. 4)}$$

Estas equações são importantes para obter o valor correto da resistividade elétrica do concreto, corrigindo o valor medido pelo equipamento.

Sanchez *et al.* (2017) apresentaram análises, pelo método dos elementos finitos, para adicionar um “fator barra”, ao cálculo da resistividade elétrica do concreto, para corrigir os valores de medições realizadas, quando há presença de armaduras.

Utilizando o software “COMSOL Multiphysics finite element”, os pesquisadores simularam um corpo de prova com dimensões: 400 x 400 x 200 mm, e consideraram que este corpo de prova teria resistividade elétrica de 100 k Ω cm. Introduziram neste corpo de prova, uma barra 25 mm de diâmetro e realizaram o

cálculo da resistividade elétrica do concreto, pelo método dos elementos finitos, de modo teórico, com a presença da barra em camadas de cobrimento distintas (5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 30 mm). O cálculo foi realizado sem considerar o “fator barra”, o qual foi determinado posteriormente. A Figura 9 ilustra a análise realizada por elementos finitos.

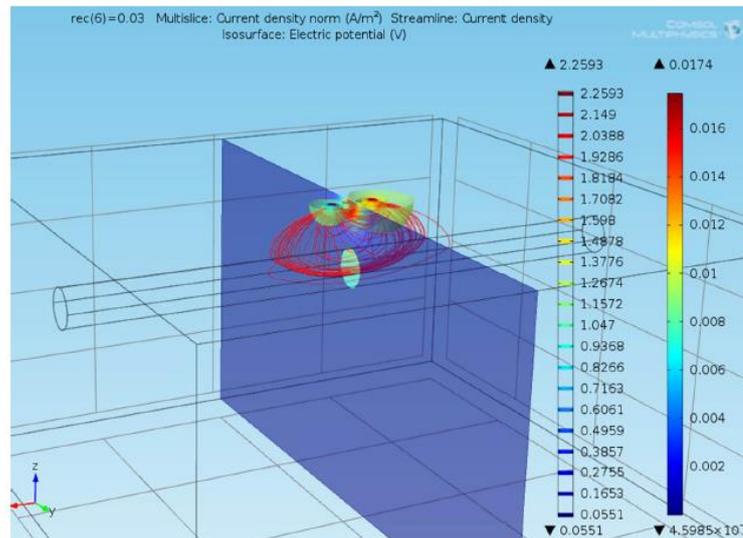


Figura 9 - Resultado do Software “COMSOL Multiphysics finite element”. Verifica-se que a corrente, linhas vermelhas, é direcionada para as barras, fato que mascara o cálculo da resistividade elétrica do concreto

Fonte: Sanchez *et al.* (2017).

Considerando os valores teóricos de resistividade elétrica do concreto, sem o “fator barra”, e considerando que o concreto simulado apresentava resistividade elétrica de 100 k Ω cm, foi possível corrigir os valores medidos, por meio da determinação do “fator barra”, em função da espessura da camada de cobrimento.

A partir da determinação deste “fator barra”, em função da espessura da camada de cobrimento, os pesquisadores realizaram medições em campo, na Ponte sobre o Rio Danúbio, entre Vidin, Bulgária e Calafat, Romênia. Desenharam panos de 1m x 1m na parte inferior da ponte, localizaram as barras, determinaram a espessura da camada de cobrimento e realizaram diversas medições em panos escolhidos aleatoriamente. Antes de realizar as medições, o concreto foi

embebido com água por, no mínimo, 60 minutos, para que os valores de resistividade fossem medidos próximos à saturação do concreto.

O equipamento utilizado para medir a resistividade foi o Geocisa RS1 e para determinar a espessura da camada de cobrimento foi utilizado o Proceq Profoscope, e em alguns casos também foi realizado um furo no concreto para medir diretamente a camada de cobrimento.

A partir dos valores de resistividade obtidos em campo e do “fator barra”, os pesquisadores realizaram a correção das medições, de acordo com estudo realizado previamente. O fator barra é apresentado na Equação 5, em função da espessura da camada de cobrimento r (mm).

$$f_b = -4,35010^{-6}r^5 + 4,42210^{-4}r^4 - 1,75210^{-2}r^3 + 0,3385r^2 - 3,206r + 13,13 \text{ (Eq. 5)}$$

A metodologia utilizada pelos pesquisadores tenta eliminar a influência da umidade na medição da resistividade elétrica superficial do concreto, a partir da utilização de água por 60 minutos, antes de realizar as medições. Entretanto, embora a utilização da água seja importante, poderia ter sido realizado algum teste para identificar a profundidade da penetração da água, visto que trata-se de uma estrutura existente. Desta forma, seria possível verificar se a metodologia adotada realmente foi eficiente neste sentido.

Existem ainda outros fatores que influenciam a resistividade elétrica do concreto, e que não foram levados em consideração. Um exemplo, seria a carbonatação, que aumenta a resistividade elétrica do concreto, de forma expressiva.

O estudo realizado por Salehi, Ghods e Isgor (2016), considerou espaçamento entre as barras, diâmetro das barras, camada de cobrimento, localização do equipamento de medição em relação à malha formada pelas barras, espaçamento entre eletrodos e espessura da laje. A análise numérica foi realizada também com a utilização de elementos finitos pelo software COMSOL Multiphysics V4.3.

No referido estudo os pesquisadores optaram por realizar as seguintes comparações na configuração das medições pelo método de quatro eletrodos (Wenner), conforme esquema mostrado na Figura 10.

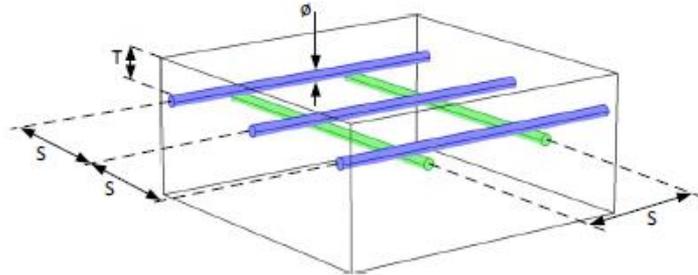


Figura 10 - Imagem representando a localização das barras, sendo T=camada de revestimento, \varnothing = diâmetro da barra, S= espaçamento entre barras paralelas na mesma direção. Verifica-se que, as barras verdes encontram-se abaixo das barras azuis, tomando-se como base a face superior da laje
Fonte: Slehi, Ghods e Isgor (2016).

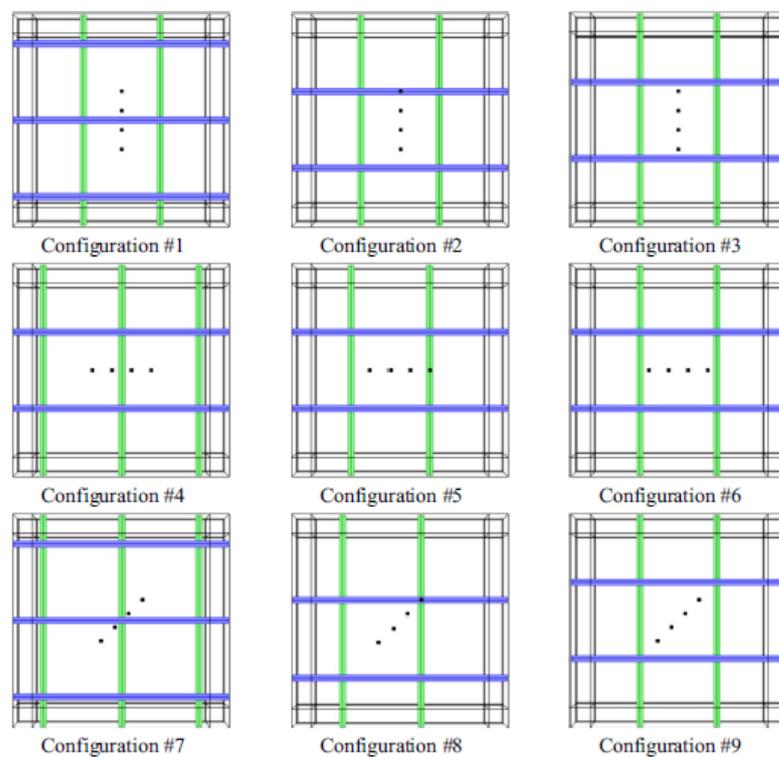


Figura 11 - Imagem representando as diferentes configurações de posicionamento dos eletrodos, em comparação com as barras de aço, nos testes realizados.
Fonte: Slehi, Ghods e Isgor (2016).

Para a influência das armaduras foram investigados os parâmetros da Tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros analisados

Parâmetro	Variável	Intervalo estudado (mm)
Cobrimento	T	25, 40, 60
Espaçamento das barras	S	50, 100, 150, 200
Diâmetro das barras	Ø	16, 25, 36

Fonte: Slehi, Ghods e Isgor (2016)

De modo similar ao procedimento adotado por Sanchez *et al.* (2017), os pesquisadores deste artigo fixaram a resistividade elétrica do concreto em 40 Ωm e a partir dos resultados com a presença das barras, apresentaram os erros de cada medida.

Quanto à orientação dos eletrodos em relação às barras, a configuração #4 foi identificada como aquela que apresenta valores mais próximos do real de resistividade elétrica do concreto fixado, ao se comparar com as outras oito configurações.

Em relação à camada de cobrimento, quanto maior a espessura da referida camada, menores foram os erros nas medições.

Quanto ao espaçamento entre as barras, foi identificado que, quanto menor o espaçamento, menor era a alteração nas medições das diferentes configurações da localização dos eletrodos. Os autores analisaram que, quanto menor o espaçamento, as medidas eram influenciadas mais pela densidade do aço do que pela posição dos eletrodos. Entretanto, quanto maior o espaçamento, menor o erro das medições ao serem comparadas com o valor real de resistividade elétrica do concreto adotado.

Em relação ao diâmetro das barras, os autores informaram que a alteração no diâmetro das barras (16, 25 e 36 mm) apresenta pouca influência nas medições.

Importante destacar que, outro autor, também apresentou informações sobre o diâmetro das barras, informando que, o efeito das barras nas medidas de

resistividade elétrica do concreto está mais relacionado com espessura da camada de cobrimento do que com o diâmetro da barra (CARINO, 1999).

Com relação à espessura das lajes, foram testadas duas dimensões, uma de 120 mm e outra de espessura infinita, com espaçamento entre barras de 100 mm a 200 mm, nas configurações #1, #4, #5, #6 e #9. Os resultados mostraram que não havia diferença significativa quando se varia a espessura da laje de infinito para 120 mm.

Este estudo, dentre os pesquisados, foi o que mais se destacou em relação à análise da resistividade elétrica do concreto em estruturas de concreto armado. O estudo abrange tanto espaçamento, quanto cobrimento e diâmetro das barras de aço, entretanto, foi realizado em elementos finitos. Verificando a possibilidade de realizar esta análise de forma experimental, o trabalho desenvolvido nesta dissertação utilizou este artigo como base.

Presuel-Moreno, Liu e Wu (2013) também utilizaram o método dos elementos finitos, por meio de um software comercial, analisando blocos de concreto de 30 cm x 30 cm x 15 cm, contendo uma ou quatro barras de aço com diâmetro de 16 mm, com espessura de cobrimento de 5 cm, conforme apresentado na Figura 12.

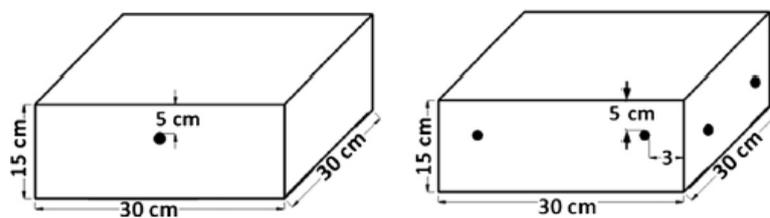


Figura 12 - Representação das dimensões dos corpos de prova utilizados na modelagem em elementos finitos

Fonte: Presuel-Moreno, Liu e WU (2013).

As medições foram realizadas conforme Figuras 13 e 14.

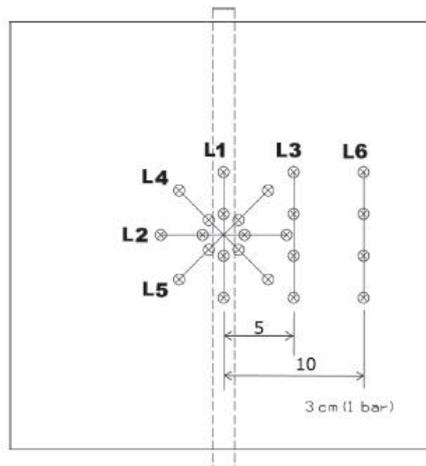


Figura 13 - Representação da localização das medições realizadas nos corpos de prova com uma barra

Fonte: Presuel-Moreno, Liu e WU (2013).

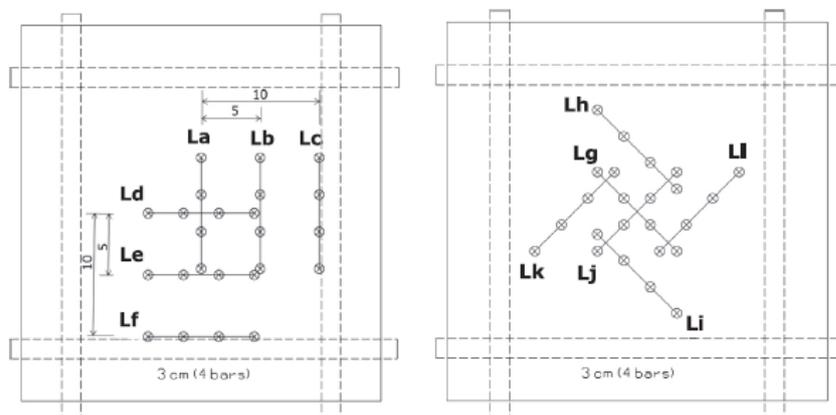


Figura 14 - Representação da localização das medições realizadas nos corpos de prova com quatro barras

Fonte: Presuel-Moreno, Liu e WU (2013).

Quanto à localização da barra, também foi identificado, assim como nos demais estudos anteriores, que quanto maior a camada de cobrimento, menor é a divergência entre os resultados de resistividade elétrica obtidos e o valor de resistividade elétrica fixado para o concreto, que neste estudo foi de 1 kΩcm.

Quanto à localização da medição, foi identificado que, a para a simulação com uma barra, considerando um corpo de prova de 1 m³, o efeito da barra poderia ser negligenciado nas medições L6 (medição paralela mais afastada da barra) e L2

(perpendicular à barra). Para L3, L4 e L5, os resultados foram similares e para L1 os resultados foram os mais dispersos. Para os corpos de prova com quatro barras, todas as medições apresentaram valores inferiores à resistividade atribuída, devido à presença das barras.

Assim como o artigo de Salehi, Ghods e Isgor (2016) o estudo foi realizado em elementos finitos. Esta análise limita a utilização do estudo, tendo em vista que a execução do concreto armado implica em diversas variáveis, que não são levadas em consideração.

Foi identificado um estudo realizado para constatar a diferença da medição realizada paralela e perpendicular à barra, assim como, dentre outros aspectos, a influência da distância da barra nas medições realizadas (SENGUL e GJØRV, 2009). Os pesquisadores utilizaram cimento Portland com aproximadamente 20% de cinzas volantes, fator a/c de 0,40 e com as características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações sobre o concreto utilizado

Cimento com cinzas volantes, kg/m ³ (lb/yd ³)	423 (713)
Água, kg/m ³ (lb/yd ³)	169 (285)
a/c	0,40
Areia (0 a 8 mm [0 a 0,3 in.]), kg/m ³ (lb/yd ³)	911 (1535)
Brita (8 a 11 mm [0,3 a 0,4 in.]), kg/m ³ (lb/yd ³)	309 (521)
Brita [0,4 a 0,6 in.], kg/m ³ (lb/yd ³)	602 (1014)
Peso unitário, kg/m ³ (lb/yd ³)	2420 (4078)
Ar (%)	0,5
Slump, mm (in)	150 (5,9)

Fonte: Adaptado de Sengul e Gjrv (2009).

Foram realizadas seis lajes, quatro com dimensões de 300 x 300 x 135 mm, as quais possuíam uma barra de aço de 10 mm de diâmetro e as outras duas lajes tinham 300 x 300 x 200 mm e não apresentavam barras de aço, conforme imagem abaixo.

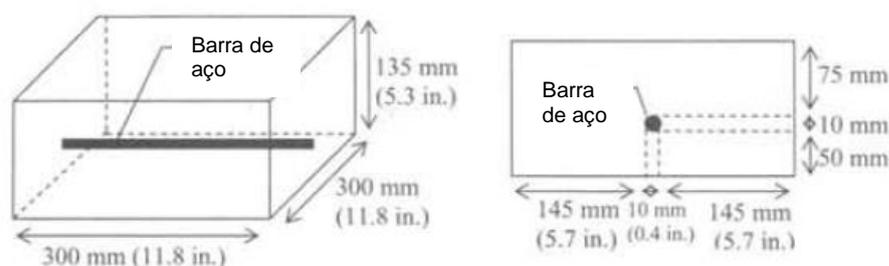


Figura 15 – Representação das medidas dos corpos de prova com uma barra.
Fonte: Adaptado de Sengul e Gjörv (2009).

Todas as lajes foram desmoldadas no dia seguinte e armazenados em água a 20°C, duas das quatro lajes que foram confeccionadas com barras de aço continuaram imersas em água até o momento do teste, enquanto as outras duas foram retiradas após 7 dias e permaneceram em contato com o ar, também a 20°C. O programa de teste foi apresentado, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Representação do programa de teste

Variável analisada	
Presença de barra de aço	300 x 300 x 135 mm (11,8 x 11,8 x 5,3 in.) corpo de prova com barra de aço 300 x 300 x 200 mm (11,8 x 11,8 x 7,9 in.) corpo de prova sem barra de aço
Cobrimento	50 e 75 mm (2 e 3 in)
Espaçamento entre eletrodos	20, 30, 40, 50 e 70 mm (0,8, 1,2, 1,6, 2,0 e 2,8 in.)
Direção da medição	Paralela à barra Perpendicular à barra
Distância da barra	1. sobre a barra (centro do corpo de prova) 2. 35 mm (1,4 in.) da barra e 110 mm (4,3 in.) da borda 3. 70 mm (2,8 in.) da barra e 75 mm (4,3 in.) da borda 4. 105 mm (4,1 in.) da barra e 40 mm (1,6 in.) da borda
Condições da cura	Cura úmida a 20° C (68 °F) Cura na temperatura ambiente do laboratório, após 7 dias de cura úmida
Idade dos testes	Todos os dias, durante os 7 primeiros dias, a cada 2 dias, entre 7 e 14 dias, a cada 3 dias, entre 14 e 30 dias

Fonte: Adaptado de Sengul e Gjörv (2009).

Quanto ao posicionamento da medição, foi descoberto que, quando a medição era paralela à barra, o valor de resistividade elétrica era inferior às medidas realizadas de forma perpendicular à barra.

Em relação às medidas paralelas à barra, também foi verificado pelos pesquisadores, qual seria o impacto no valor das medições considerando o distanciamento das barras de aço, conforme ilustrado na Figura 16.

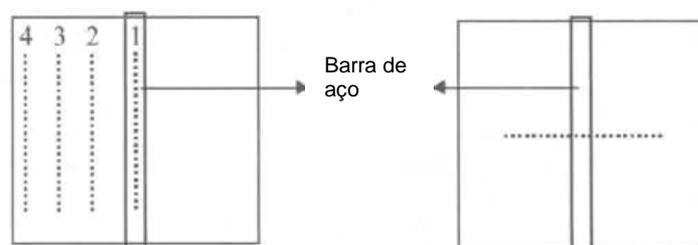


Figura 16 - Representação da localização das medições realizadas nos corpos de prova com uma barra

Fonte: Adaptado de Sengul e Gjörv (2009).

Foi identificado pelos pesquisadores que quanto maior a distância da barra de aço, maior o valor de resistividade medido.

Neste estudo também foi verificado que quanto maior a camada de cobrimento, menor é a redução da medida de resistividade, ao se comparar com os corpos de prova sem barras de aço.

Os resultados deste estudo convergiram com os demais estudados anteriormente. Um dos fatores que aumenta a sua importância é que trata-se de uma análise experimental, assim como foi realizada nesta dissertação.

Na revisão realizada, foi identificado outro estudo, elaborado por Ferreira (2011), o qual realizou testes em dois grupos de peças de concreto. As peças apresentavam idades variadas: seis blocos, confeccionados em 2004 (grupo 1) e dez vigas, confeccionados em 2009 (grupo 2).

Os blocos apresentavam dimensões de 40 cm x 40 cm x 80 cm e as vigas apresentavam dimensões de 20 cm x 30 cm x 200 cm. Os blocos foram divididos em três grupos, com dois blocos cada, o primeiro grupo foi confeccionado somente com brita 0, traço: 1:2,50:2,94 e fator a/c 0,67, o segundo, com brita 1, traço: 1:2,53:3,93 e fator a/c 0,67, o terceiro, com 50% de brita 1 e 50% de brita 2, traço: 1:2,40:4,10 e fator a/c 0,67, o cimento utilizado foi o CP III 32 RS. As vigas foram confeccionadas com traço: 1:2,65:3,35 e fator a/c 0,58 e o cimento utilizado foi o CP II Z – 32.

Em relação à resistividade elétrica do concreto, o pesquisador avaliou a variação da dimensão máxima do agregado, a camada de concretagem, presença e posicionamento da armadura e a variação da umidade superficial das peças de concreto.

A variação da umidade superficial foi feita com a aplicação de água nas superfícies das amostras de maneira uniforme por aspersão, com o emprego de um recipiente apropriado e composto de um sistema de pressurização no interior (FERREIRA, 2011). Para a aferição da umidade foi utilizado o aparelho KETT Modelo HI-520.

Neste estudo foram realizadas medições nas vigas em três faixas distintas, conforme Figura 17. Verificou-se que, as camadas inferiores (HI) e superiores (HS) encontravam-se em locais onde havia a presença de armaduras. Esta presença de barras, deveria reduzir a resistividade elétrica do concreto medida. Entretanto, foi identificado o efeito contrário no estudo realizado, conforme imagem abaixo.

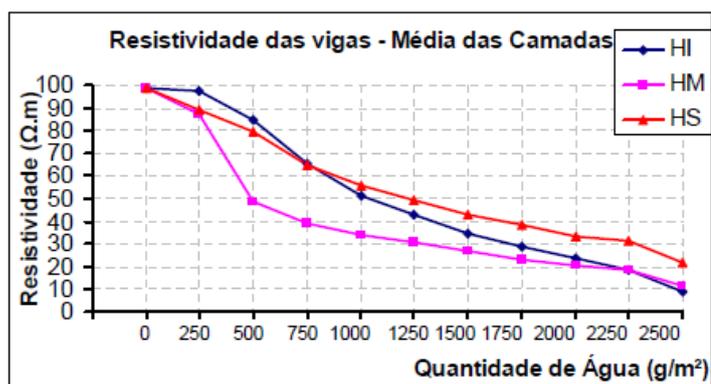


Figura 17 - Resultados sobre a influência da umidade na resistividade das vigas ensaiadas
Fonte: Ferreira (2011).

Verifica-se que, a curva das faixas superiores e inferiores, locais onde há presença de armadura, apresentam valores de resistividade elétrica do concreto superiores às faixas intermediárias.

Pelos estudos analisados anteriormente, este fato pode ter ocorrido pela camada de cobertura da viga ensaiada, a qual pode ter contribuído para que a barra de aço não influenciasse, de forma expressiva, nos resultados das medições.

Outro fator importante neste estudo foi, novamente, a constatação de que, quanto maior a umidade do corpo de prova, menor será a resistividade elétrica do concreto medida.

Gowers e Millard (1999), identificaram que quando a medição ocorre paralelamente sobre a armadura, há erro significativo na medição. Entretanto, quando a medição é realizada de modo ortogonal, os erros não são significantes. Foi elaborado ainda um gráfico no qual os pesquisadores apresentam a relação entre a razão da medida de resistividade e a real resistividade e a razão da espessura da camada de cobertura e o espaçamento entre os eletrodos do equipamento, conforme Figura 18.

Na Figura 18 é possível identificar que, conforme informado no artigo, o erro é bastante reduzido quando o espaçamento entre os eletrodos é inferior a $2/3$ da

camada de revestimento, ou seja, quando a relação entre camada de revestimento e espaçamento entre eletrodos é superior a 1,5.

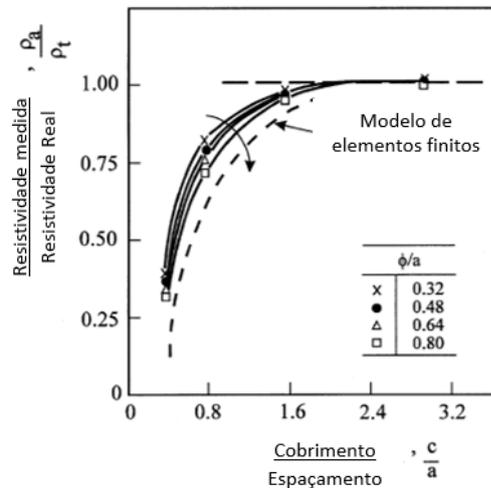


Figura 18 – Resultados sobre a influência das barras nas medições
Fonte: Adaptado de Gowers e Millard (1999).

Weydert e Gehlen (1999), também estudaram a presença do aço utilizando o método de quatro eletrodos (Wenner), conforme Figura 19. Foi produzido um corpo de prova com barras a 1 mm, 10 mm e 20 mm de revestimento.

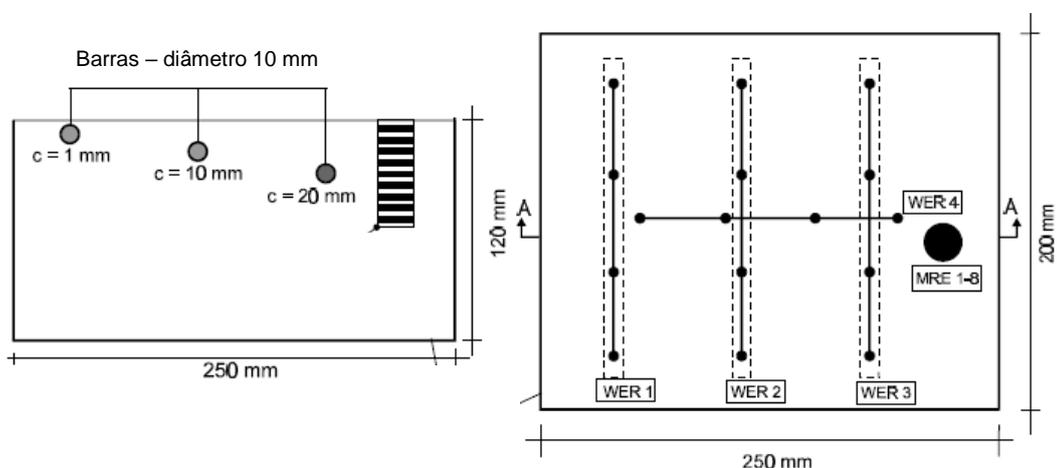


Figura 19 - Ilustração do corpo de prova elaborado e da posição dos eletrodos nas medições
Fonte: Weydert e Gehlen (1999).

Os referidos pesquisadores concluíram que, como esperado, as medições realizadas sobre a barra de 1 mm de revestimento apresentaram forte influência no resultado, informando que a maior parte da corrente pode ter sido transmitida pelo

ação, sendo que a medição reduziu rapidamente para zero. Informaram ainda que os cobrimentos de 10 e 20 mm também sofreram grande influência nas medições.

Os resultados dos autores também corroboram o que já foi apresentado pelos outros estudos anteriores. Entretanto, os corpos de prova foram armazenados durante um ano em laboratório a 65% de umidade e 20°C. Este período de armazenamento provocou (como informa no artigo) a ocorrência de carbonatação, fato que altera de forma expressiva os resultados. A carbonatação associada à não saturação total dos poros cria variáveis que distorcem parte dos resultados.

Também foi identificada outra pesquisa na qual os autores confeccionaram corpos de prova prismático com as dimensões: (12x12x11) cm, (16x16x14) cm e (20x20x17,5) cm posicionando, no centro do corpo de prova, uma barra de 1,3 cm de diâmetro (CHEN, CHANG e YEIH, 2014). Esta configuração possibilitou realizar medições paralelas às barras, em diversos cobrimentos. A Tabela 4, refere-se a um dos resultados apresentados pelos autores no artigo. É possível identificar que, conforme esperado por outros estudos, quanto maior o cobrimento, maior é a resistividade elétrica do concreto dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 4 - Resultados dos testes realizados no corpo de prova prismático de 12x12x11cm.

Cobrimento, c (cm)	Resistividade (kΩcm)
0,7	2,24
2,7	3,73
4,7	3,82
6,0	4,53
8,0	3,63
10,0	5,03

Fonte: Adaptado de Chen, Chang e Yeih (2014).

3.8 Metodologia de medição

Neste item serão apresentadas informações constantes em artigos e normas técnicas identificadas, relacionadas às metodologias de medição utilizadas.

3.8.1 Normas Técnicas

O Departamento de Transportes da Flórida desenvolveu uma metodologia (FM5-578, 2004) para a realização de medições de resistividade elétrica superficial.

O equipamento determinado para os experimentos, é o que possui espaçamento entre as sondas de 1,5" (38,1 mm) e a quantidade de corpos de prova determinada são três amostras de 4,0x8,0" (100 x 200 mm).

Após a desmoldagem dos corpos de prova, devem ser realizadas marcas a 0°, 90° 180° e 270° na longitudinal dos mesmos, para referência nas medições.

Quanto ao procedimento de medição (FM5-578, 2004): Posicionar as sondas do equipamento, de forma longitudinal na marca de 0°. Certificar que as sondas estão posicionadas na lateral do corpo de prova. Esperar de 3 a 5 segundos ou até uma medição estável ser obtida.

Repetir este passo para 90°, 180°, 270° e posteriormente, repetir o processo novamente, para cada um dos três CPs.

Calcular a média das oito medições de cada CP, e posteriormente calcular a média dos três CPs.

Foi identificada outra norma, do Departamento de Transportes e Desenvolvimento de Louisiana (DOTD-TR-233-11, 2011), que basicamente apresenta as mesmas informações da metodologia utilizada pelo Departamento de Transportes da Flórida, tanto para a medição (oito medições), quanto para o equipamento a ser utilizado (espaçamento entre as sondas de 1,5" - 38,1 mm) e número de corpos de prova (três). A diferença básica é que o Departamento de Transportes e Desenvolvimento de Louisiana também considera utilizar o método para corpos de prova de 15x30 cm.

Foi identificada ainda a norma técnica AASHTO T358-17 (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT, 2017) que substituiu a AASHTO TP 95 (2014), a qual apresenta basicamente as mesmas informações da metodologia utilizada pelo Departamento de Transportes e Desenvolvimento de Louisiana, tanto para a quantidade de medições (oito por CP a cada 90°), quanto para o equipamento a ser utilizado (espaçamento entre as sondas de 1,5” - 38,1 mm), número de corpos de prova (três) e tipos de corpos de prova (10x20 cm ou 15x30 cm).

3.8.2 Outros artigos

Foram analisados outros artigos, os quais somente apresentavam como referência as normas citadas anteriormente (vide Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo de outros artigos analisados com indicação das normas referenciadas nos trabalhos.

	Artigo	Autores	Revista	Ano	Tipo de CP	Norma referenciada
1	Influence of parameters on surface resistivity of concrete	Pratanu Ghosh Quang Tran	Cement & Concrete Composites	2015	10x20cm / 15x30cm	AASHTO TP-95
2	Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete	Bishnu P. Gautam, Daman K. Panesar, Shamim A. Sheikh, Frank J. Vecchio	Cement and Concrete Research	2017	285mm x 75mm x 75mm	-
3	Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC ₃)	Yuvaraj Dhandapani, T. Sakthivel, Manu Santhanam, Ravindra Gettu, Radhakrishna G. Pillai	Cement and Concrete Research	2018	10 x 20cm	-
4	Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag	Susanto Teng; Tze Yang Darren Lim; Bahador Sabet Divsholi	Construction and Building Materials	2013	10 x 20cm	-

5	Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method	Xuhao Wang; Kejin Wangb; Peter Taylor; George Morcouc	Construction and Building Materials	2014	10 x 20cm	DOTD TR 233-11
6	Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash	J.C. Arenas-Piedrahita; P. Montes-García; J.M. Mendoza-Rangel; H.Z. López Calvo; P.L. Valdez-Tamez; J. Martínez-Reyes	Construction and Building Materials	2016	10 x 20cm	AASHTO - não informa número
7	The development of a low carbon binder produced from the ternary blending of cement, ground granulated blast furnace slag and high calcium fly ash: An experimental and statistical approach	Ali Abdulhussein Shubbar; Hassnen Jafer; Anmar Dulaimi; Khalid Hashim; William Atherton; Monower Sadique	Construction and Building Materials	2018	10 x 20cm	AASHTO T 358
8	The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete	Amin Noushini; Arnaud Castel	Construction and Building Materials	2016	10 x 20cm	AASHTO TP-95
9	Leaching of conductive species: Implications to measurements of electrical resistivity	R. Spragg; S. Jones; Y. Bu; Y. Lu; D. Bentz; K. Snyder; J. Weiss	Cement and Concrete Composites	2017	10 x 20cm	Referencia a AASHTO TP 95

3.9 Valores de referência

Identificou-se um relatório o qual informa que dependendo das condições ambientais e da qualidade do concreto, a resistividade pode variar da ordem de 10^1 até 10^5 Ω .m, influenciada pelo teor de umidade e pela composição do concreto. A resistividade é maior para concreto seco, é aumentada pela utilização de baixas relações água/cimento ou pela adição de escória de alto forno, cinza volante, sílica ativa ou outro componente reativo (COX *et al.*, 1997).

O referido estudo apresenta ainda na Tabela 6, alguns parâmetros de referência.

Tabela 6 – Valores de referência para resistividade elétrica do concreto

Nível de corrosão	Insignificante	Baixo	Moderado	Alto
ρ (Ωm)	> 1000	1000 – 500	500 – 100	< 100

Fonte: Adaptado do Relatório COST 509, editado por Cox *et al.* (1997).

Mehta e Monteiro (2008) também apresentaram valores de referência para a resistividade elétrica do concreto, provenientes da “CEB-192 Recommendation Based on Concrete Resistivity to Estimate de Likely Corrosion Rate” conforme Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de referência para resistividade elétrica do concreto

Resistividade do concreto (Ωm)	Taxa de corrosão
> 200	Insignificante
100-200	Baixa
50-100	Alta
<50	Muito alta

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008).

Os Departamentos de Transportes da Flórida e da Louisiana também apresentam outros valores de referência, conforme Tabelas 8 e 9.

Tabela 8 – Valores de referência para a resistividade elétrica do concreto

Permeabilidade ao íon Cloreto	Teste de resistividade elétrica superficial ($\text{k}\Omega\text{-cm}$)
Alta	< 12
Moderada	12 - 21
Baixa	21 - 37
Muito Baixa	37 - 254
Insignificante	> 254

Fonte: Adaptado do Departamento de Transportes da Flórida (2004).

Tabela 9 - Valores de referência para a resistividade elétrica do concreto

Permeabilidade ao íon Cloreto	Teste de resistividade elétrica superficial	
	100-mm x 200-mm (4 in. x 8 in.) Cilíndrico (kOhm-cm) a = 1,5	150-mm x 300-mm (6 in. x 12 in.) Cilíndrico (kOhm-cm) a = 1,5
Alta	< 12,0	< 9,5
Moderada	12,0 – 21,0	9,5 - 16,5
Baixa	21,0 – 37,0	16,5 - 29,0
Muito Baixa	37,0 – 254,0	29,0 - 199,0
Insignificante	> 254,0	> 199,0

Fonte: Adaptado do Departamento de Transportes e Desenvolvimento de Louisiana (2011).

Por fim, a norma AASHTO T358-17, também apresenta valores de referência para a resistividade superficial do concreto, conforme Tabela 10, identificados aos valores do Departamento de Transportes e Desenvolvimento de Louisiana (2011).

Tabela 10 - Valores de referência para a resistividade elétrica do concreto

Permeabilidade ao íon Cloreto	Teste de resistividade elétrica superficial	
	100-mm x 200-mm (4 in. x 8 in.) Cilíndrico (kOhm-cm) a = 1,5	150-mm x 300-mm (6 in. x 12 in.) Cilíndrico (kOhm-cm) a = 1,5
Alta	< 12,0	< 9,5
Moderada	12,0 – 21,0	9,5 - 16,5
Baixa	21,0 – 37,0	16,5 - 29,0
Muito Baixa	37,0 – 254,0	29,0 - 199,0
Insignificante	> 254,0	> 199,0

Fonte: Norma AASHTO T358-17.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Pelo estudo dos artigos e das normas técnicas apresentadas no item anterior é possível informar que, em relação à utilização da resistividade elétrica superficial em estruturas existentes (in situ), não foi identificada uma norma brasileira ou outra internacional que apresentasse subsídios técnicos para esta análise.

Verificou-se, portanto, a necessidade de contribuir com o estudo da resistividade elétrica do concreto, com análises experimentais, elaboradas por meio da confecção de corpos de prova com a presença de barras de aço. Sendo assim, neste item serão apresentados os materiais e os métodos utilizados no trabalho experimental.

O procedimento experimental foi realizado conforme Figura 20.

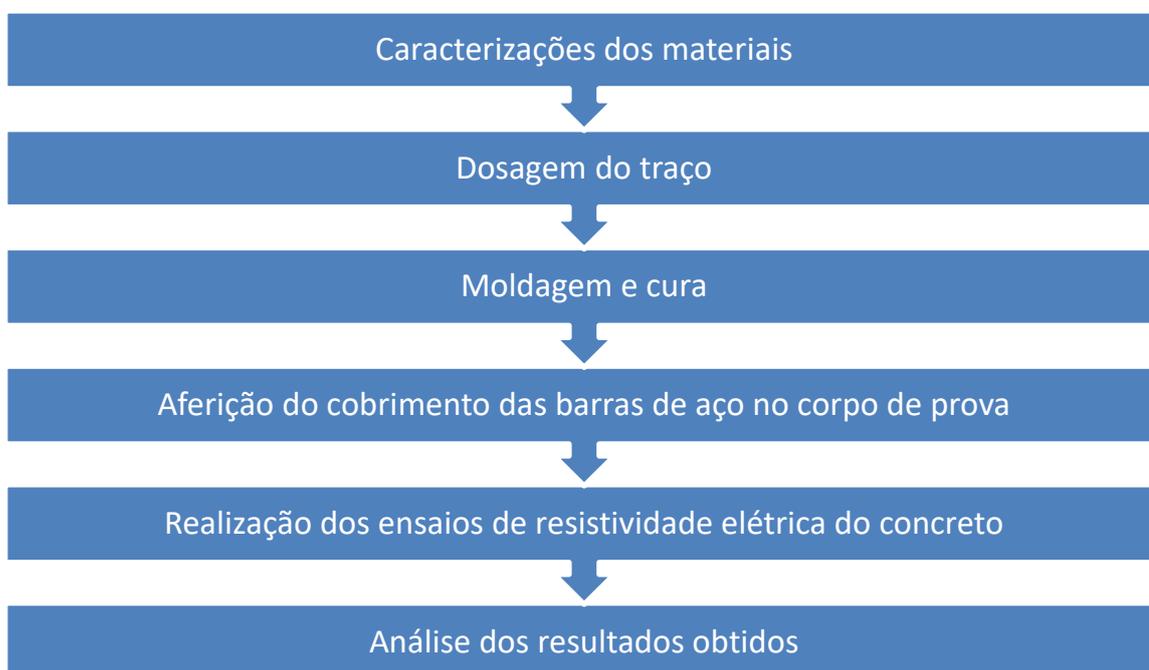


Figura 20 – Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental realizado.

4.1 Caracterização dos materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram escolhidos com o objetivo de tentar reproduzir situações que fossem possíveis de serem encontradas na prática, ou seja, nas obras existentes na região metropolitana de Belo Horizonte/MG.

Para a produção dos corpos de prova, foram utilizados dois tipos de cimentos Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, água e aditivo. Neste item também será apresentado o aparelho de resistividade elétrica utilizado no estudo.

4.1.1 Cimento

Foram utilizados dois tipos de cimento Portland, Cimento CP V- ARI e CP IV-32-RS, ambos produzidos e doados pela empresa Lafarge Holcim. A referida empresa também coletou amostras dos sacos de cimentos doados e realizou caracterizações químicas dos mesmos, conforme Figuras 21 e 22.

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE : CP V ARI FÁCIL FÁBRICA PEDRO LEOPOLDO				
ENSAIOS	PERÍODO	APLO 53876 09.04.2018				LIMITES NBR5733
ENSAIOS FÍSICOS						
	Média	3,0				
# 400 (%) IT Holcim	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média					
# 325 (%) NBR 9202	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	4668				≥ 3000
Blaine (cm³/g) NBR NM 16372	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	135				≥ 60
Início Pega (min) NBR NM 65	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	180				≤ 600
Fim Pega (min) NBR NM 65	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média					≤ 5
Exp. Quente (mm) NBR 11582	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	30,0				≥ 14,0
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	44,7				≥ 24,0
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	48,8				≥ 34,0
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Desv. Pad. Nº Amostras					
	Média	55,5				
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Desv. Pad. Nº Amostras					

Figura 21 – Ensaios físicos do cimento Portland CP V - ARI - Fácil.
Fonte: Relatório de assessoria técnica, Lafarge Holcim.

ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	3,71				≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656	18,93				
R.I.	NBR NM 15	0,42				≤ 1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656	4,82				
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	3,01				
CaO	NBR 14656	65,12				
MgO	NBR 14656	0,60				
SO ₃	NBR 14656	2,93				≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20	2,80				≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656	0,72				
PF 500°C	IT Holcim	0,63				
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue	7,36				

OBSERVAÇÕES:
1. IT = Intrução de Trabalho
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)


Eng. Fabrício Carlos França
Assessoria Técnica MG

APLO_CP_V_ARI_PLUS_VENDAS.xls 22 maio, 2018

Figura 22 – Análise química do cimento Portland CP V - ARI - Fácil.
Fonte: Relatório de assessoria técnica, Lafarge Holcim.

LafargeHolcim		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO				
		TIPO / CLASSE : CP IV 32 RS				
		FÁBRICA PEDRO LEOPOLDO				
ENSAIOS	PERÍODO	02.01.2018				LIMITES NBR 5736 / 5737
		26.01.2018				
ENSAIOS FÍSICOS						
# 200 (%)	Média					≤ 8
NBR 11579	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
# 400 (%)	Média	11,9				
IT Holcim	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
Blaine (cm ² /g)	Média	4802				
NBR 16372	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
Início Pega (min)	Média	218				≥ 60
NBR NM 65	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
Fim Pega (min)	Média	305				≤ 720
NBR NM 65	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
Exp. Quente (mm)	Média					≤ 5
NBR 11582	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
R 1 dia (MPa)	Média	4,9				
NBR 7215	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
R 3 dias (MPa)	Média	16,6				≥ 10,0
NBR 7215	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
R 7 dias (MPa)	Média	25,1				≥ 20,0
NBR 7215	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					
R 28 dias (MPa)	Média	37,1				≥ 32,0
NBR 7215	Desv. Pad.					
	Nº Amostras					

Figura 23 – Ensaios físicos do cimento Portland CP IV-32-RS
Fonte: Relatório de assessoria técnica, Lafarge Holcim.

ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	3,97				≤ 4,5 %
SiO ₂	NBR 14656	28,76				
R.I.	NBR NM 15					
Al ₂ O ₃	NBR 14656	8,48				
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	3,75				
CaO	NBR 14656	48,82				
MgO	NBR 14656	2,38				≤ 6,5 %
SO ₃	NBR 14656	1,57				≤ 4,0 %
CO ₂	NBR NM 20	3,00				≤ 3,0 %
K ₂ O	NBR 14656	0,97				
PF 500°C	IT Holcim	0,63				
C ₃ A (Teórico)	Equação Bogue	3,78				
OBSERVAÇÕES: 1. IT = Intrusão de Trabalho						
						 Eng. Fabricio Carlos França Assessoria Técnica MG
APL0_CP_IV_32_VENDAS.xls		22 maio, 2018				

Figura 24 – Análise química do cimento Portland CP IV-32-RS
 Fonte: Relatório de assessoria técnica, Lafarge Holcim.

A escolha da realização do estudo com dois tipos de cimento teve como intuito verificar a influência do tipo de cimento, em relação ao impacto da presença de barras, nas medições de resistividade elétrica superficiais das lajes ensaiadas.

A escolha dos dois tipos de cimento (CP V- ARI e CP – IV – 32 – RS) foi motivada por dois fatores:

1. Os dois tipos de cimentos, na época deste estudo, encontravam-se em ampla utilização no mercado da construção civil no município de Belo Horizonte/MG;
2. Conforme um estudo consultado (MEDEIROS-JUNIOR e LIMA, 2016), foi identificado que os dois tipos de cimentos escolhidos apresentariam comportamentos distintos, sendo que a resistividade do CP-V-ARI provavelmente apresentaria valores com pouca dispersão ao longo do tempo e os valores de resistividade do CP-IV-32-RS provavelmente apresentaria valores crescentes ao longo do tempo (vide Figura 25).

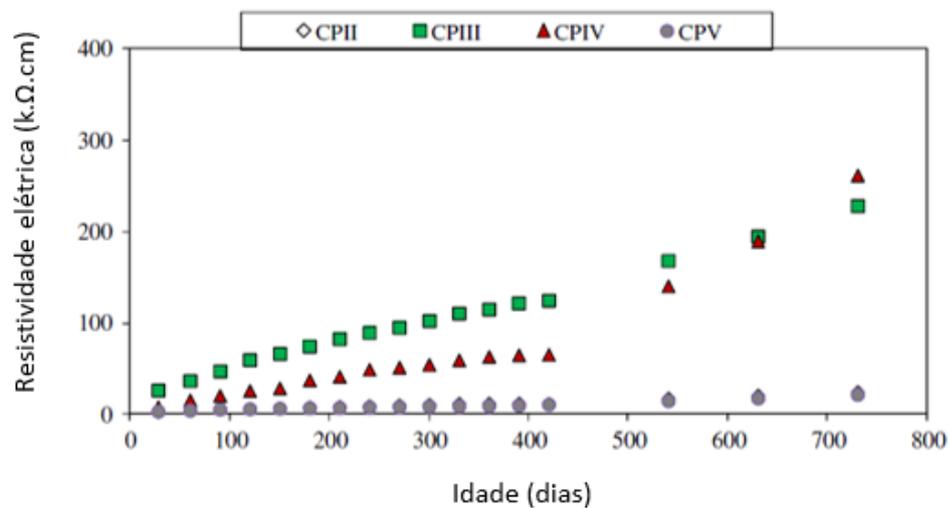


Figura 25 – Evolução da resistividade elétrica de diferentes tipos de cimento, para relação $a/c = 0,50$

Fonte: Adaptado de Medeiros-Junior e Lima (2016).

Verifica-se que, em comparação com o CP IV, o CP III apresentaria características mais distintas do que o CP V. Entretanto, optou-se por não utilizar o CPIII tendo em vista que, conforme consulta ao mercado da construção civil, na época deste estudo, o CPIII encontrava-se em desuso. Também descartou-se a utilização do CP II, tendo em vista que o seu comportamento é análogo a CPV (conforme Figura 25).

4.1.2 Agregado miúdo

Utilizou-se como agregado miúdo, na produção de todos os corpos prova, uma areia artificial, comercializada na região metropolitana do Município de Belo Horizonte/MG. Foram realizados os testes de Granulometria por peneiramento, massa específica real, massa unitária solta e massa unitária compactada, cujos resultados encontram-se abaixo.

Tabela 11 – Resultados dos testes de caracterização realizadas para a areia utilizada.

Massa específica real	2,605 g/cm ³
Massa unitária solta	1,542 g/cm ³
Massa unitária compactada	1,943 g/cm ³

Em relação à granulometria, foi obtido a Dimensão Máxima Característica de 2,4 mm, Módulo de Finura de 1,71 e a curva granulométrica apresentada na Figura 26.

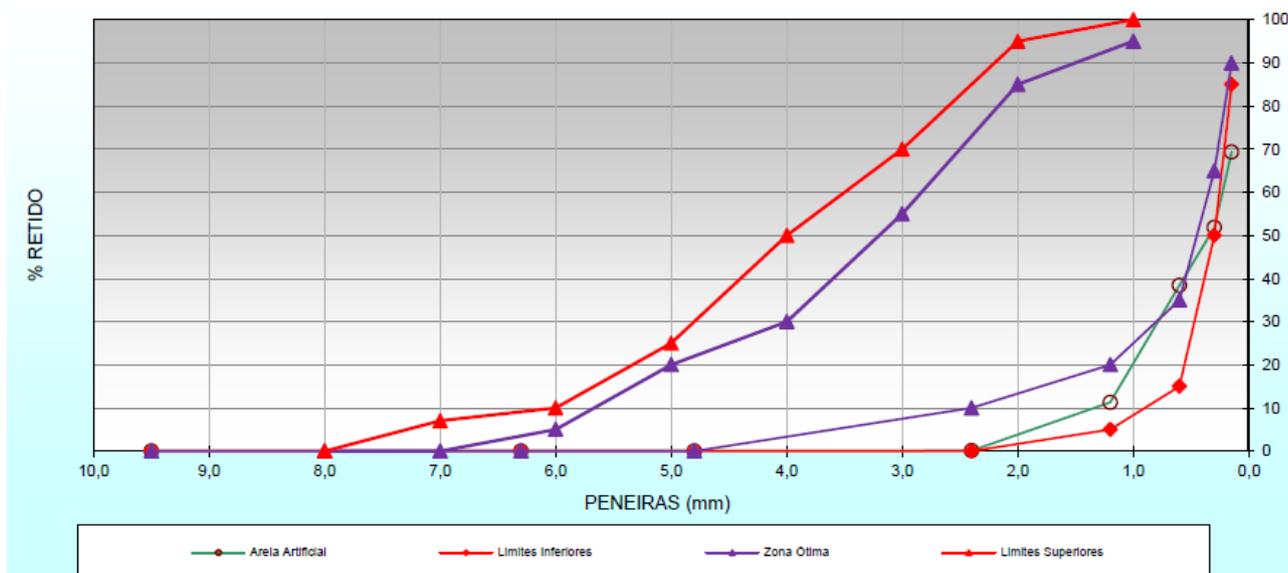


Figura 26 – Curva granulométrica da areia utilizada no estudo.

O agregado miúdo foi adquirido em uma das principais fornecedoras de agregados da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG. Portanto, mesmo verificando que a curva granulométrica não permaneceu 100% dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), optou-se por utilizar o referido agregado obtido, tendo em vista que seria o existente nas obras da região, mantendo a premissa inicial do estudo de tentar relatar ao máximo as possíveis situações obtidas em campo.

4.1.3 Agregado graúdo

Utilizou-se como agregado graúdo, na produção de todos os corpos prova, uma brita 0, comercializada na região metropolitana do Município de Belo Horizonte/MG. Foram realizados os testes de Granulometria por peneiramento, massa específica, massa específica aparente, absorção de água, massa unitária solta e massa unitária compactada, cujos resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos testes de caracterização realizadas para a brita utilizada.

Massa específica do agregado seco	2,568g/cm ³
Massa específica do agregado saturado superfície seca	2,528g/cm ³
Massa específica aparente	2,502g/cm ³
Absorção de água	1,02%

Em relação à granulometria, foi obtida zona granulométrica d/D 4,75/12,5, dimensão máxima característica de 12,5mm e a curva granulométrica da Figura 27.

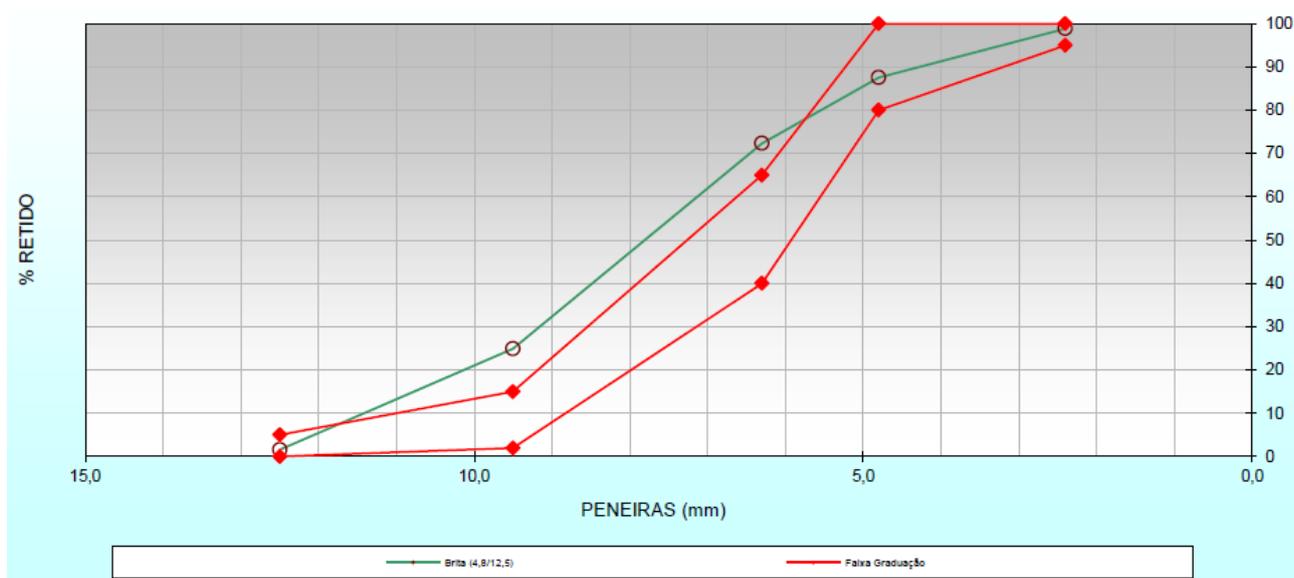


Figura 27 – Curva granulométrica da brita utilizada no estudo.

Da mesma forma que o agregado miúdo, o agregado graúdo foi adquirido em uma das principais fornecedoras de agregados da Região Metropolitana de Belo Horizonte/MG. Portanto, mesmo verificando que a curva granulométrica não permaneceu 100% dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), optou-se por utilizar o referido agregado obtido, tendo em vista que seria o existente nas obras da região, mantendo a premissa inicial do estudo de tentar relatar ao máximo as possíveis situações obtidas em campo.

4.1.4 Água

Utilizou-se água, proveniente da Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, responsável pela rede de abastecimento de água de Belo Horizonte.

4.1.5 Aditivo

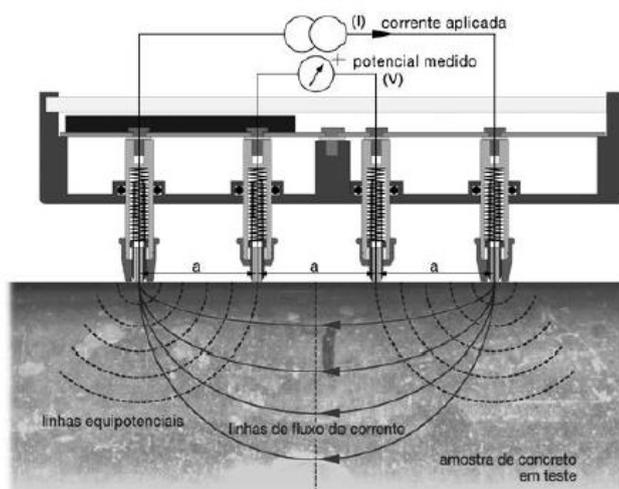
Foi utilizado um aditivo superplastificante de alto desempenho, com pH = 6,8, ponto de ebulição inicial em 100° C, densidade 1,08 g/cm³ e dosagem recomendada entre 0,2% e 5,0% sobre o peso do cimento. A dosagem utilizada foi de 1,08% sobre o peso do cimento.

4.1.6 Aço

Foram utilizadas barras de aço com 10mm de diâmetro, aço CA-50.

4.1.7 Aparelho medidor de resistividade elétrica superficial

Neste estudo foi utilizado o Resipod da empresa PROCEQ, com espaçamento de 50 mm entre os eletrodos, conforme mostrado na Figura 28. Trata-se basicamente de um aparelho com quatro eletrodos, sendo dois eletrodos nas extremidades, nos quais existe a aplicação de uma corrente e dois eletrodos centrais, nos quais existe a medição da diferença de potencial. Com os valores do espaçamento entre os eletrodos (a), diferença de potencial (V) e corrente aplicada (I), é possível calcular a resistividade, cuja fórmula também encontra-se na Figura 28. Portanto, basicamente o Resipod opera com um voltímetro e um amperímetro, os quais possibilitam o cálculo da resistividade elétrica do concreto.



O Resipod foi concebido para medir a resistividade elétrica do concreto. É aplicada uma corrente às duas sondas nas extremidades e a diferença de potencial é medida entre as duas sondas internas. A corrente é carregada por íons no líquido do poro da estrutura. A resistividade calculada depende do espaçamento destas sondas.

$$\text{Resistividade } \rho = 2\pi aV/I \text{ [k}\Omega\text{cm]}$$

Figura 28 - Informações sobre o aparelho utilizado no estudo
Fonte: Instruções de Operação do Resipod (2017).

4.2 Dosagem dos traços

A estratégia traçada para a dosagem dos traços utilizados no trabalho foi no sentido de obter concretos com, no mínimo, 30 MPa de resistência à compressão axial, e que obedecesse aos parâmetros para enquadramento em classe de agressividade III (forte) da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014). Portanto, foi necessário que os traços desenvolvidos apresentassem uma relação água/cimento inferior a 0,55.

Optou-se por utilizar um Concreto Autoadensável – CAA, devido à presença de barras nos corpos de prova confeccionados. Utilizando o CAA em comparação com o concreto convencional, foi possível eliminar a utilização de vibrador e conseqüentemente as barras presentes nos corpos de prova foram submetidas a menores deslocamentos, contribuindo com o estudo.

Conforme informado anteriormente, foram utilizados dois tipos de cimento, CP V-ARI e CP-IV-32-RS, para as duas séries de corpos de prova ensaiados. Entretanto, para analisar somente uma variável, o traço das duas séries foi mantido, alterando-se somente o tipo de cimento.

A quantidade de material utilizada para as duas séries, assim como os resultados dos testes Funil-V, espalhamento, resistência a compressão axial e módulo de elasticidade encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros do traço utilizado no estudo.

Parâmetros	CPV-ARI	CP-IV-32-RS
Resistência à compressão axial	38,5 MPa	41,7 MPa
Relação água/cimento	0,55	0,55
Consumo de Areia industrial média	910,67 kg/m ³	910,67 kg/m ³
Consumo de Brita 0	1.130,26 kg/m ³	1.130,26 kg/m ³
Consumo de Cimento	387,52 kg/m ³	387,52 kg/m ³
Concentração de Aditivo (por peso de cimento)	1,08%	1,08%
Espalhamento	705 mm	715 mm
Funil V	16,69 s	12,92 s
Módulo de Elasticidade	38,8 GPa	32,0 GPa

4.3 Dimensões dos corpos de prova

Foram confeccionadas doze lajes de concreto com dimensões de 340x340x85mm, com e sem barras de aço. O esquema apresentado na Figura 29 elucida a quantidade de corpos de prova produzida no estudo.

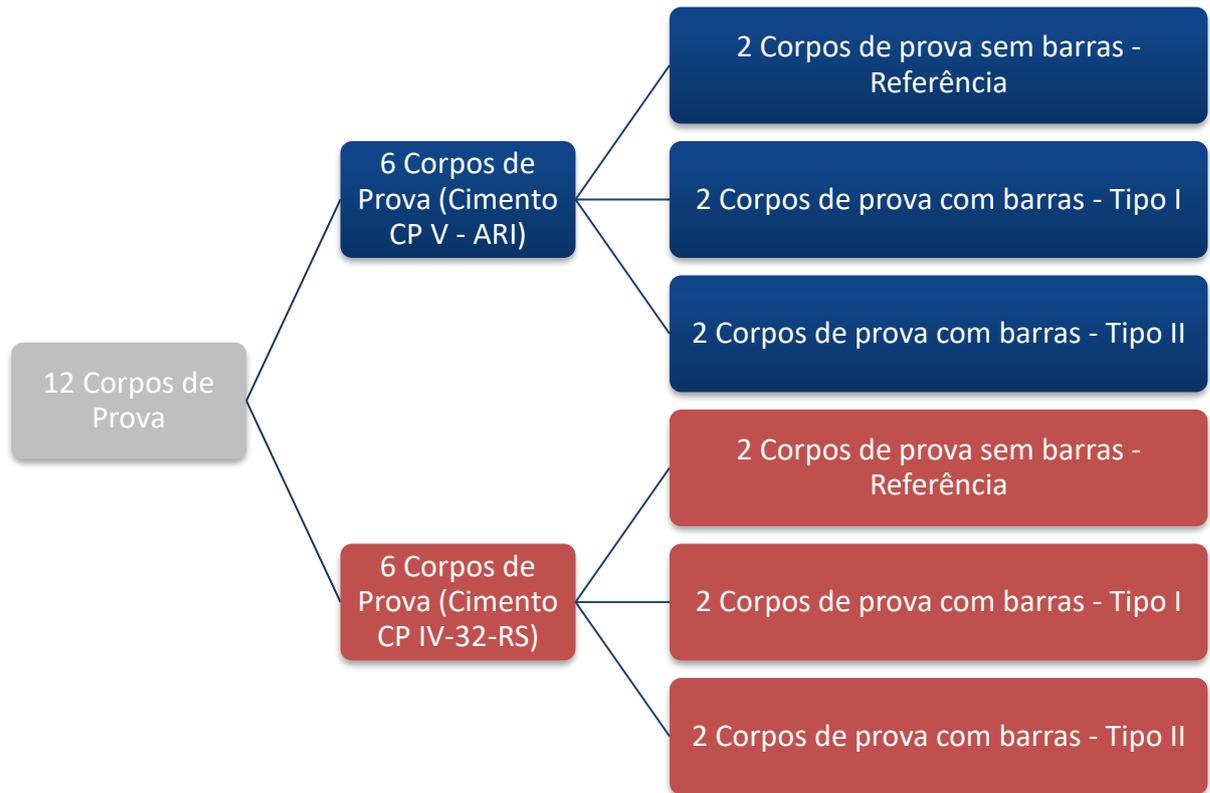


Figura 29 – Imagem ilustrativa da distribuição dos corpos de prova confeccionados.

As Figuras 30 e 31 esclarecem as medições dos corpos de prova e das barras de aço utilizadas e os tipos de corpos de prova.

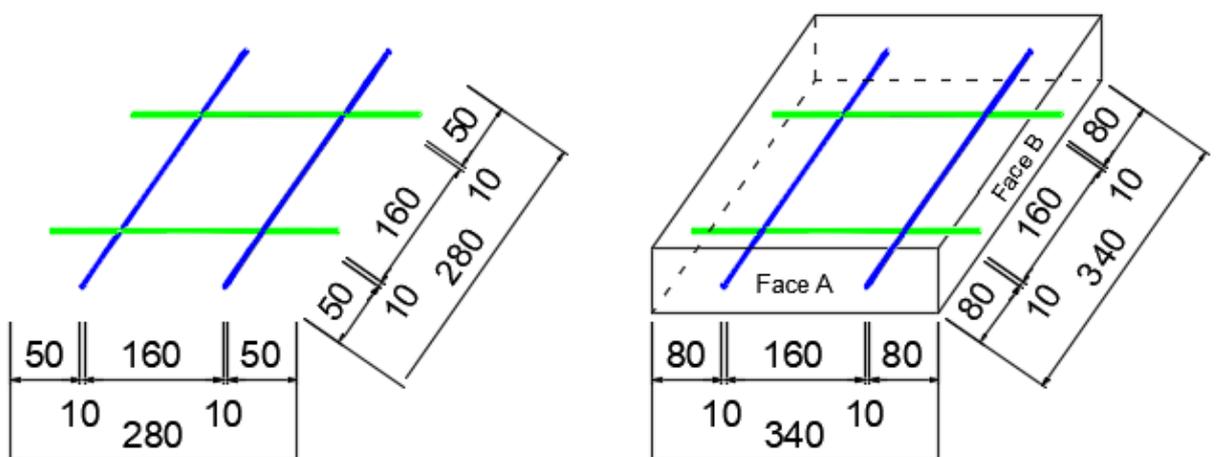
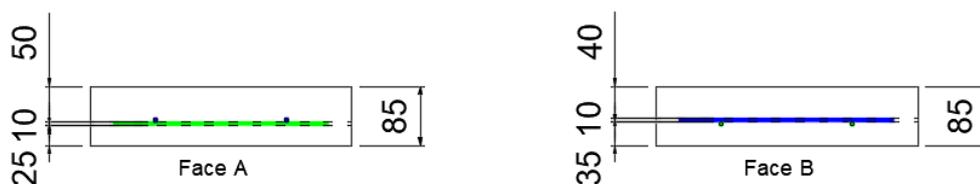


Figura 30 – Imagem ilustrativa das dimensões dos corpos de prova confeccionados (valores em mm).

Corpo de Prova - Tipo I



Corpo de Prova - Tipo II

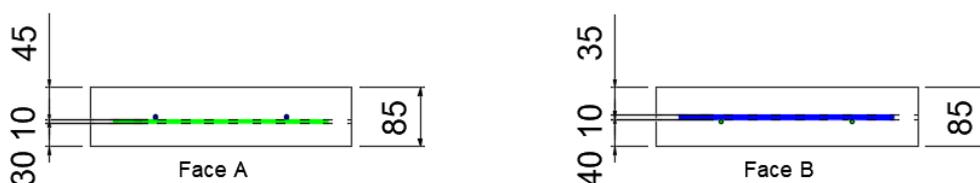


Figura 31 – Imagem ilustrativa das dimensões dos corpos de prova confeccionados (valores em mm).

A escolha da largura, altura e profundidade dos corpos de prova, assim como espaçamentos e cobrimentos das barras de aço foram determinadas basicamente por dois motivos:

1. Viabilizar a movimentação dos corpos de prova durante o experimento, tendo em vista que eles permaneceram submersos durante todas as medições.

Para esta viabilidade do experimento foi estimado o peso do corpo de prova (cerca de 20 kg) e as dimensões para que fosse possível armazenar nos tanques que encontravam-se disponíveis para o estudo.

2. Permitir o estudo de um espaçamento e cobrimentos comuns de obras de engenharia civil, entre as barras de aço utilizadas.

Para estes parâmetros foram realizadas consultas a profissionais de engenharia civil especialistas em cálculo estrutural, cujas informações embasaram a escolha de um espaçamento interno das barras (face a face) de 160 mm.

O espaçamento de 160mm também permitiu o posicionamento do aparelho de medição de resistividade (Resipod Proceq 50 mm) no centro da malha (de forma diagonal), sem estar posicionado diretamente sobre uma barra. O aparelho possui quatro sondas em linha reta, que distam 50 mm entre si, totalizando uma distância de 150 mm, entre os eletrodos das pontas. Portanto, o espaçamento escolhido permite a medição da resistividade das duas formas indicadas no manual do aparelho (vide Figura 2).

A escolha dos cobrimentos foi realizada com base nos parâmetros apresentados na tabela 7.2 da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), conforme Tabela 14, para o “Tipo de estrutura”: Concreto armado, nas classes de agressividade II, III e IV, para lajes, vigas/pilares e elementos estruturais em contato com o solo. Embora o estudo contemple somente lajes de 340x340x85mm, optou-se também por analisar os cobrimentos dos demais elementos apresentados na referida tabela.

Tabela 14 – Cobrimentos analisados.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: ABNT NBR 6118:2014.

4.4 Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados sobre uma bancada de granito, com divisórias em madeira e em alumínio. Para facilitar a desmoldagem foi utilizado desmoldante nas peças, assim como foi colocado um plástico na parte inferior dos corpos de prova, em contato com a bancada de granito. A posição das barras nos corpos de prova foi obtida pela utilização de espaçadores.

Após a moldagem dos corpos de prova foi realizada uma cura úmida durante dois dias (por meio de aspersão de água), e posteriormente os corpos de prova foram desmoldados e submetidos a cura úmida até o momento das medições.

As Figuras 32, 33, 34 e 35 elucidam os procedimentos adotados.



Figura 32 – Gabarito para moldagem dos corpos de prova



Figura 33 – Imagem aproximada do gabarito para moldagem dos corpos de prova



Figura 34 – Detalhe do espaçador e do plástico utilizado na moldagem dos corpos de prova



Figura 35 – Local onde os corpos de prova foram armazenados

A bancada em granito, o uso de plástico na parte inferior e os perfis em alumínio foram adotados para facilitar a concretagem dos corpos de prova assim como para obter uma confiabilidade nas dimensões dos corpos de prova.

Os espaçadores foram utilizados nas pontas das malhas metálicas, visando influenciar o mínimo possível a medição da resistividade elétrica.

A opção por soldar as barras foi escolhida para evitar eventual influência de arames e facilitar o posicionamento das barras, além de manter o espaçamento adotado durante a concretagem.

Conforme informado anteriormente, os corpos de prova foram submetidos nos dois primeiros dias a cura úmida por meio de aspersão de água e posteriormente a cura submersa. Optou-se por realizar a cura desta forma para que não houvesse risco de perda de corpos de prova, na hipótese de movimentá-los antes de estarem enrijecidos o suficiente para serem movimentados. A opção pela cura submersa foi de manter as mesmas condições de temperatura, umidade e saturação dos poros ao longo dos ensaios, evitando o impacto destes parâmetros nas medidas realizadas.

4.5 Medições realizadas nos corpos de prova

Foram realizadas medições em 16 configurações diferentes (posicionamentos diferentes do aparelho de medição de resistividade elétrica superficial) em cada face dos corpos de prova, conforme apresentado na Figura 36.

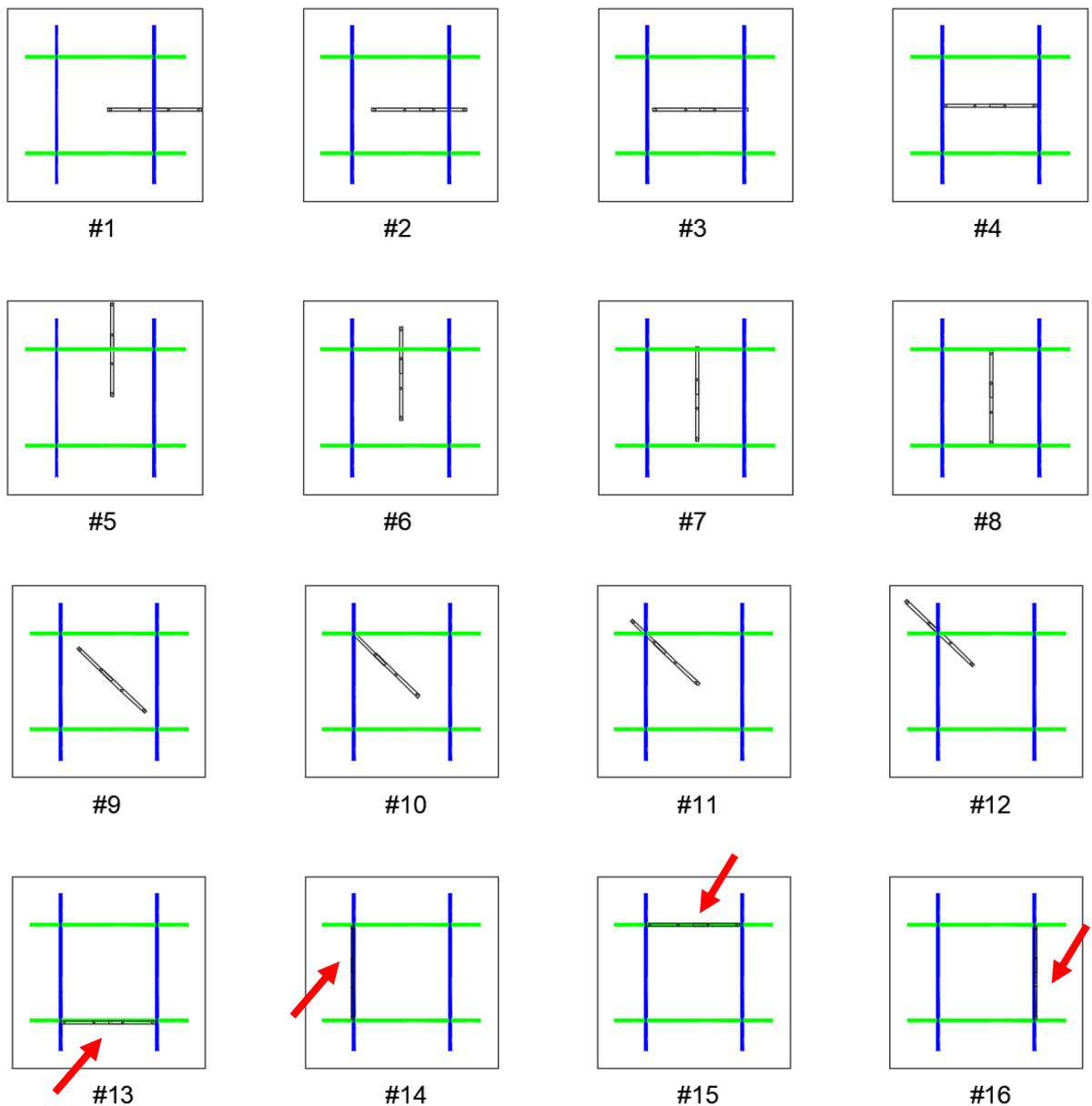


Figura 36 – Configurações (posicionamentos) analisados em cada face dos corpos de prova. As configurações #13, #14, #15 e #16 foram realizadas sobre as barras de aço, portanto, as setas existentes na figura indicam a localização do aparelho.

Em cada configuração (posicionamento do aparelho de medição de resistividade elétrica superficial) foram realizadas cinco medições sucessivas, alterando poucos milímetros de uma para a outra. Foi adotada a configuração original do aparelho para realizar as medições (fator de correção – 1,0).

Conforme informado anteriormente, foram confeccionados 6 corpos de prova (quatro com barras e dois de referência), para cada tipo de cimento analisado, sendo que cada corpo de prova apresentava duas faces ensaiadas, totalizando, portanto, em $6 \times 2 \times 5 \times 16 = 960$ medições, por dia de ensaio, por série de tipo de cimento.

As medições foram realizadas em 7, 14, 21, 28, 56, e 91 dias, após a concretagem. Para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-32-RS não foram realizadas as medições para o dia 14, assim como não foram realizadas as medições do dia 21 para os corpos de prova confeccionados com o cimento CP V – ARI.

Após a concretagem também foi realizada a aferição dos cobrimentos executados, por meio da utilização de dois equipamentos medidores de camadas de cobrimento. Partes dos corpos de prova foi verificada com um medidor e parte com outro, devido à disponibilidade dos referidos equipamentos e datas de concretagem dos corpos de prova. A Figura 37 apresenta os aparelhos utilizados.



Figura 37 – Aferição das camadas de cobrimento executadas

Conforme esperado, os corpos de prova não apresentaram exatamente as espessuras de camadas de revestimento planejadas. Entretanto, com o auxílio dos equipamentos apresentados na Figura 37 foi possível verificar as espessuras das camadas de revestimento executadas, as quais estão apresentadas na Figura 38 (para os corpos de prova confeccionados com o cimento CP-V-ARI) e Figura 39 (para os corpos de prova confeccionados com o cimento CP-IV-32-RS).

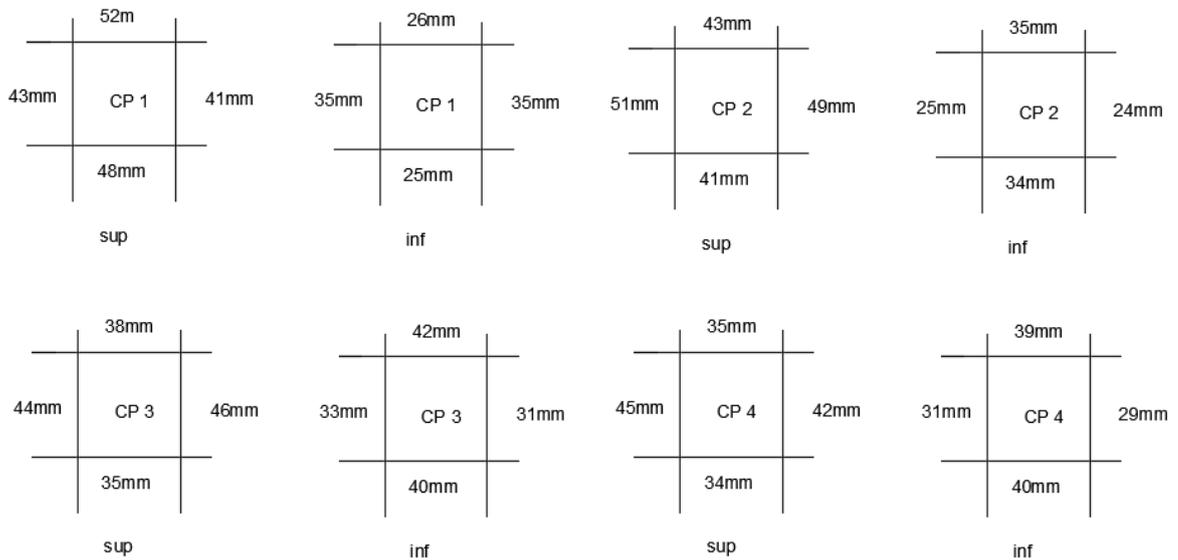


Figura 38 – Cobrimentos das face inferiores (inf) e superiores (sup) dos corpos de prova confeccionados com cimento CP-V-ARI.

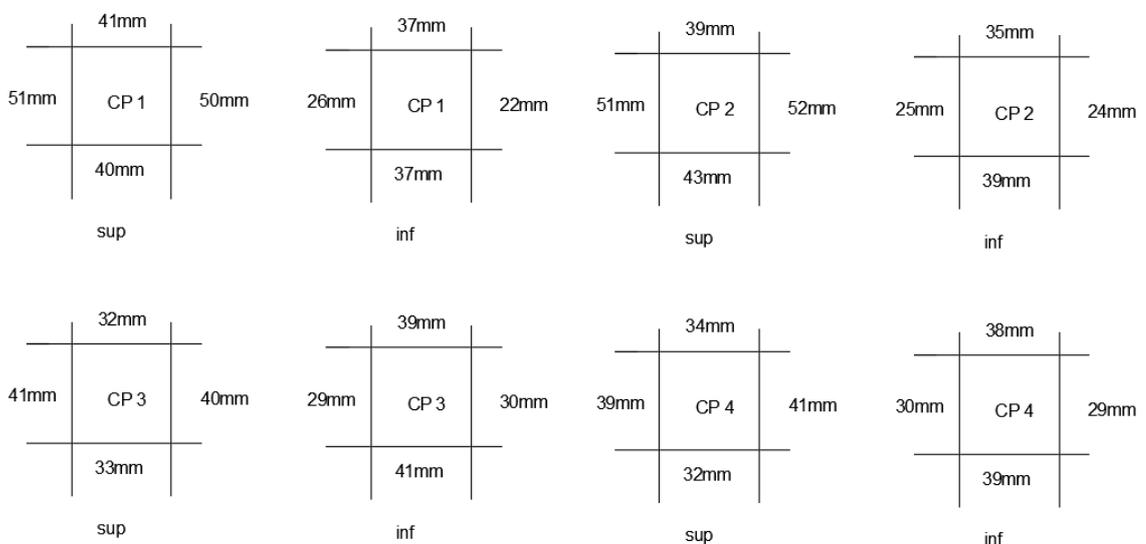


Figura 39 – Cobrimentos das face inferiores (inf) e superiores (sup) dos corpos de prova confeccionados com cimento CP-IV-32-RS.

As normas existentes e analisadas no item de revisão bibliográfica não apresentavam direcionamento para medições em lajes ou corpos de prova diferentes dos cilíndricos. A opção por realizar cinco medições sucessivas foi tomada com base em Polder (2001).

A escolha dos locais das medições foi tomada com base nas pesquisas realizadas, que apresentavam configurações paralelas, perpendiculares e diagonalmente às barras, mas principalmente na pesquisa realizada por Slehi, Ghods e Isgor (2016) – vide subitem 3.7.

Optou-se por realizar medições em diversos locais dos corpos de prova para possibilitar uma análise mais abrangente da influência das barras, avaliando a espessura da camada de revestimento, a proximidade do aparelho em relação à interseção das barras (local da solda), a configuração do aparelho (perpendicular paralelo ou diagonalmente às barras), entre outras análises, as quais serão apresentadas no item seguinte deste trabalho.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos na análise experimental realizada. Todas as medições realizadas encontram-se no Apêndice deste trabalho.

5.1 Resistividade elétrica superficial do concreto x tempo (corpos de prova de referência)

O primeiro resultado a ser apresentado não leva em consideração a presença de barras nos corpos de prova. Neste subitem é apresentada a evolução da resistividade elétrica do concreto ao longo do tempo.

Com o intuito de simplificar a análise, inicialmente será apresentado no gráfico da Figura 40, a média das medições realizadas nas configurações #4, #8 e #9, para a face superior dos corpos de prova, que referem-se às posições centrais das placas (mais distantes das bordas), conforme pode ser verificado na Figura 36.

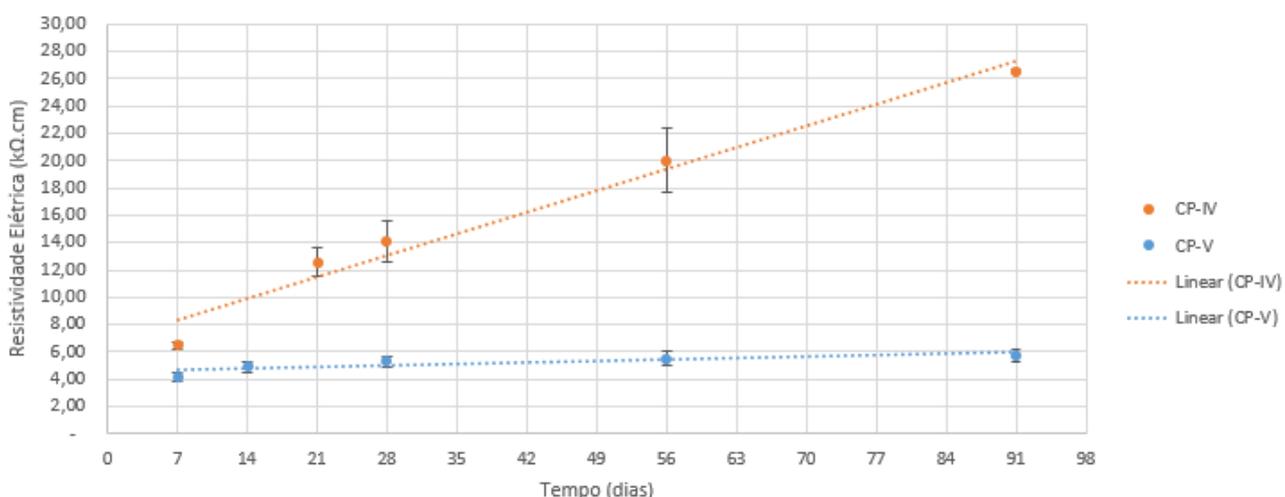


Figura 40 – Gráfico da variação da resistividade elétrica superficial do concreto ao longo do tempo (para as configurações #4, #8 e #9 da Figura 36).

Pode-se observar no gráfico da Figura 40 que, conforme esperado, os corpos de prova de referência (sem barras) confeccionados com cimento CP-V-ARI

apresentaram resistividade elétrica superficial inferior aos corpos de prova de referência confeccionados com cimento CP-IV-32-RS. Este efeito provavelmente é provocado pela presença de adições no cimento CP-IV-32-RS (pozolana), que reduzem a permeabilidade do concreto, em comparação com o cimento CP-V-ARI. Embora não tenha sido realizado nenhum teste que permitisse comparar a permeabilidade dos concretos ensaiados, pode-se informar que, esta análise também foi identificada por Medeiros-Junior e Lima (2016) – vide Figura 25.

5.2 Resistividade elétrica superficial do concreto x posição do aparelho (corpos de prova de referência)

Verificou-se que as medições realizadas nas idades específicas dos testes, apresentaram resultados semelhantes, em relação à posição do aparelho, ou seja, as variações entre as configurações (posições do aparelho no corpo de prova) foram semelhantes ao longo dos dias de medição. Entretanto, é possível constatar o que foi apresentado no subitem anterior, em relação ao aumento da resistividade elétrica superficial ao longo do tempo.

Os gráficos apresentados nas Figuras 41 a 44, representam os resultados obtidos, para as duas séries analisadas neste estudo (CP-V-ARI e CP-IV-32-RS), nas faces superiores dos corpos de prova.

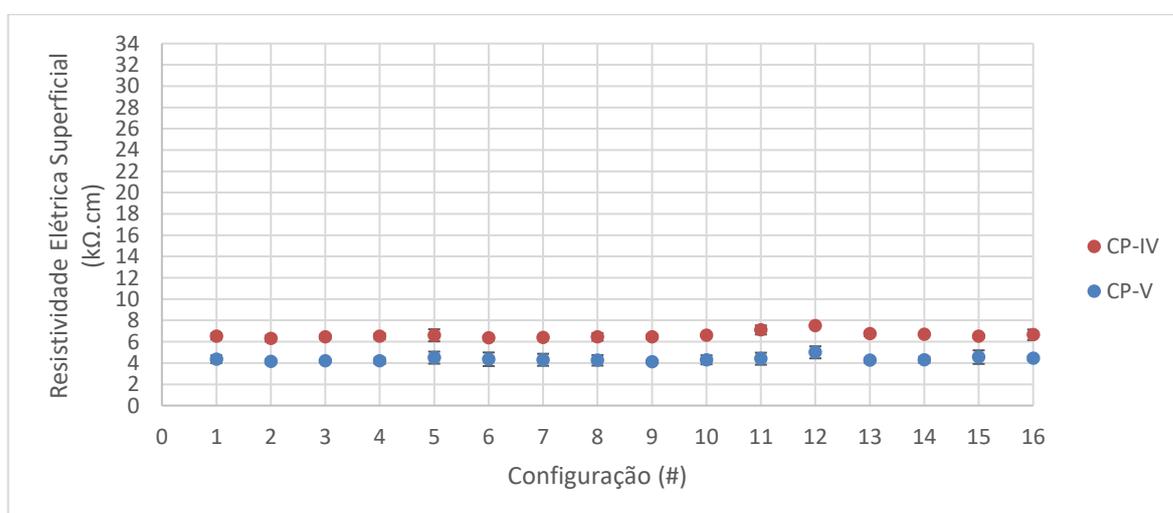


Figura 41 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 7º dia, após a concretagem.

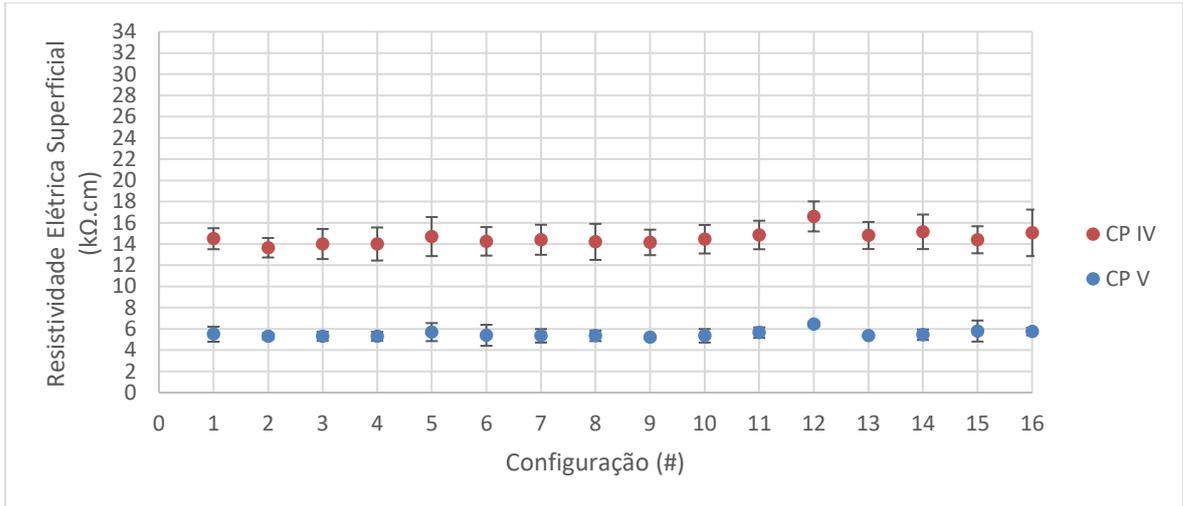


Figura 42 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 28º dia, após a concretagem.

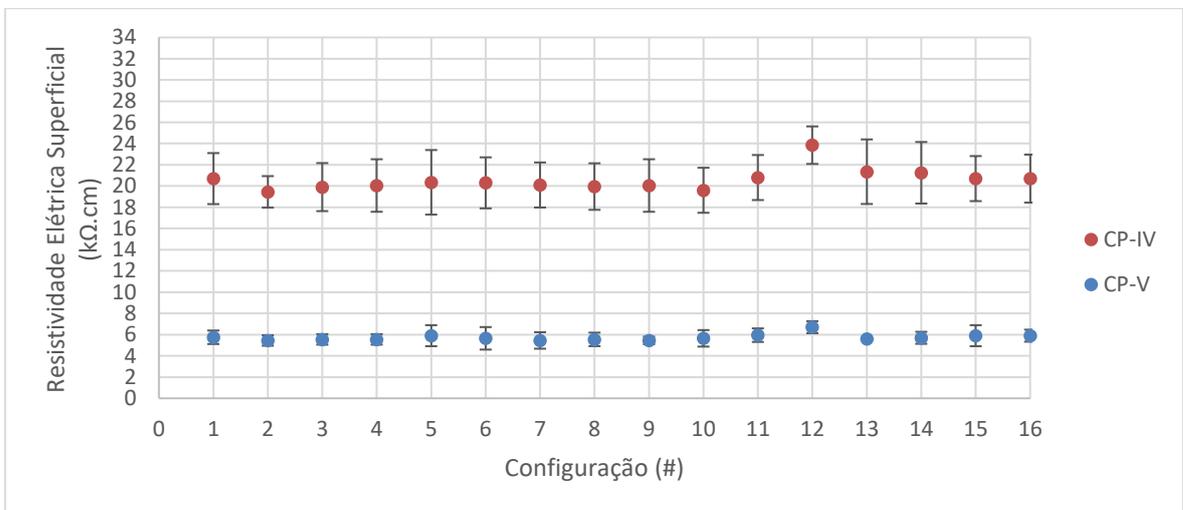


Figura 43 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 56º dia, após a concretagem.

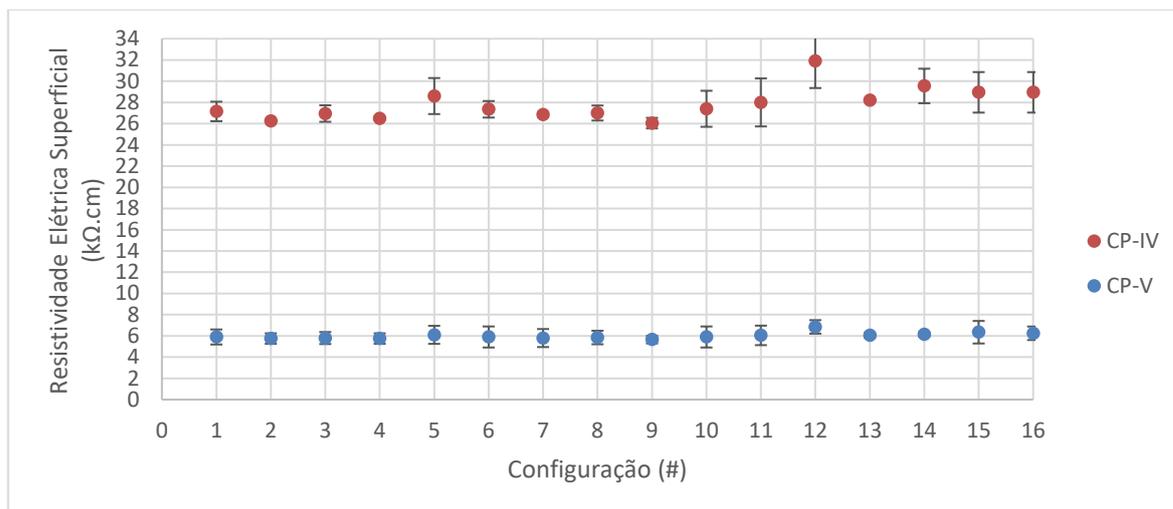


Figura 44 – Gráfico com valores de resistividade elétrica superficial dos corpos de prova de referência para todas as configurações da Figura 36, no 91º dia, após a concretagem.

Foi possível verificar que, as configurações #1, #5 e #12 apresentaram, em média, valores medidos de resistividade elétrica superficial acima das demais configurações. Este fato deve-se provavelmente a um efeito de borda produzido pela proximidade das referidas configurações às bordas dos corpos de prova (vide Figura 36). Verifica-se ainda que, a configuração #12 apresenta valores acima das configurações #1 e #5, tendo em vista que encontra-se próximo a duas bordas dos corpos de prova (medição realizada na diagonal). Portanto, este fato (configuração #12 apresentar valores acima das configurações #1 e #5) contribui para a hipótese de que há efeito de borda nas medições realizadas próximas às bordas dos corpos de prova.

Pela análise dos gráficos acima é possível verificar ainda que as demais configurações (exceto #1, #5 e #12) apresentam valores muito próximos entre si. Provavelmente por estarem nas partes mais centrais dos corpos de prova, evitando os efeitos de borda.

5.3 Influência das barras nas medidas de resistividade elétrica superficial do concreto

Considerando que existem efeitos de borda, conforme verificado no subitem anterior, a análise da influência das barras foi realizada de forma direta, sendo

comparadas de forma equivalente em relação às configurações das medições (posições do aparelho).

Foi obtido um coeficiente de equivalência, que refere-se ao quociente entre a resistividade medida (no corpo de prova com barras) e a resistividade de referência (corpo de prova sem barras), como exemplo, para o corpo de prova 01, da série confeccionada com cimento CP-V-ARI, foi realizada a medição na configuração #1 (conforme explicado no subitem 4.5). O valor obtido foi dividido pelo valor correspondente à média das medições dos dois corpos de prova de referência (CP 05 e CP 06), na mesma configuração (#1). A Figura 45 elucida esta situação.

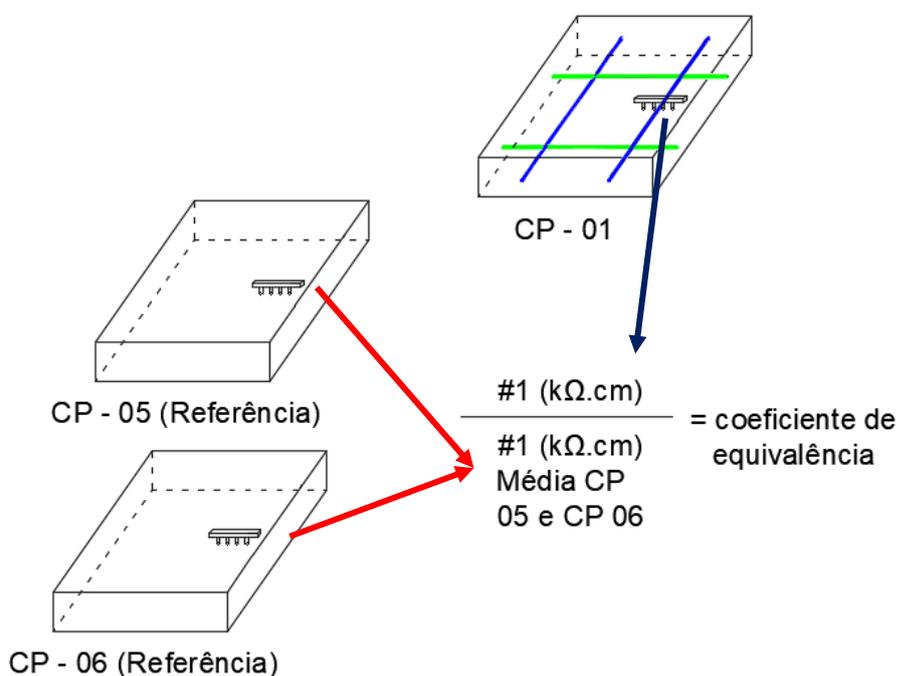


Figura 45 – Esquema elucidativo da obtenção do coeficiente de equivalência.

A partir dos resultados obtidos foi possível realizar análises sobre a influência das barras nos Coeficientes de Equivalência (Resistividade Medida / Resistividade de Referência) ao longo do tempo e em cada configuração (posição do aparelho), conforme subitens seguintes.

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados, foram agrupadas as configurações #1 e #5, #2 e #6, #3 e #7, #4 e #8, tendo em vista que tratam-se da mesma configuração, entretanto, em sentidos diferentes.

As configurações #13, #14, #15 e #16 também foram agrupadas, pois todas foram realizadas sobre as barras, entretanto, apresentavam duas posições distintas. Conforme mostrado na Figura 46, a posição 1 refere-se as medições realizadas sobre as barras mais próximas da face da placa (menor cobertura) e a posição 2 refere-se as medições realizadas sobre as barras mais distantes da face da placa (maior cobertura), sendo que entre a barra considerada e a face onde localiza-se o aparelho existe a presença de duas barras perpendiculares à barra de referência (maior cobertura).

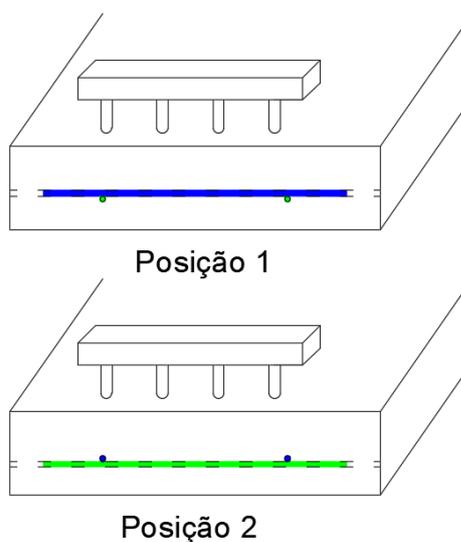


Figura 46 – Esquema elucidativo das posições 1 e 2 das medições realizadas sobre as barras (configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36).

5.3.1 *Influência das barras e da posição do equipamento nos coeficientes de equivalência, ao longo do tempo*

As Tabelas 15 a 34 e as Figuras 51 a 60, apresentam os resultados obtidos no estudo.

Tabela 15 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #1 e #5 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
24,00	0,60	0,61	3%	0,59	-4%	0,59	0%	
26,00	0,68	0,67	-3%	0,63	-5%	0,58	-8%	
29,00	0,79	0,83	4%	0,85	2%	0,78	-8%	
31,00	0,68	0,64	-6%	0,64	0%	0,63	-2%	
35,00	0,65	0,64	-2%	0,60	-5%	0,59	-2%	
35,00	0,66	0,65	-1%	0,62	-6%	0,64	4%	
35,00	0,73	0,75	3%	0,80	6%	0,75	-5%	
38,00	0,84	0,81	-4%	0,78	-3%	0,82	5%	
39,00	0,82	0,99	20%	0,85	-14%	0,82	-3%	
41,00	0,83	0,84	1%	0,82	-2%	0,76	-7%	
42,00	0,75	0,77	2%	0,74	-4%	0,73	-1%	
42,00	0,83	0,85	3%	0,83	-2%	0,78	-7%	
43,00	0,73	0,74	0%	0,73	-1%	0,75	3%	
46,00	0,90	0,84	-7%	0,80	-4%	0,81	2%	
49,00	0,76	0,85	13%	0,83	-2%	0,83	-1%	
52,00	0,84	0,77	-9%	0,78	1%	0,75	-3%	

Tabela 16 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #1 e #5 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
22,00	0,64	0,60	-5%	0,56	-8%	0,60	7%	
24,00	0,71	0,65	-9%	0,59	-9%	0,62	5%	
29,00	0,46	0,44	-5%	0,42	-4%	0,42	1%	
30,00	0,65	0,64	-1%	0,63	-3%	0,67	7%	
32,00	0,68	0,65	-4%	0,68	4%	0,67	-1%	
34,00	0,65	0,62	-5%	0,64	4%	0,58	-9%	
35,00	0,74	0,69	-6%	0,68	-2%	0,71	5%	
37,00	0,74	0,64	-13%	0,62	-2%	0,65	5%	
38,00	0,58	0,61	5%	0,56	-9%	0,54	-4%	
39,00	0,72	0,72	0%	0,74	2%	0,69	-7%	
39,00	0,74	0,67	-9%	0,65	-3%	0,72	11%	
40,00	0,66	0,68	2%	0,67	-1%	0,66	-1%	
41,00	0,63	0,59	-6%	0,56	-6%	0,62	11%	
41,00	0,79	0,69	-13%	0,64	-7%	0,68	6%	
50,00	0,71	0,69	-3%	0,69	0%	0,69	0%	
52,00	0,77	0,73	-5%	0,72	-1%	0,75	4%	

O gráfico da Figura 47 agrupa todos os resultados das Tabelas 15 e 16.

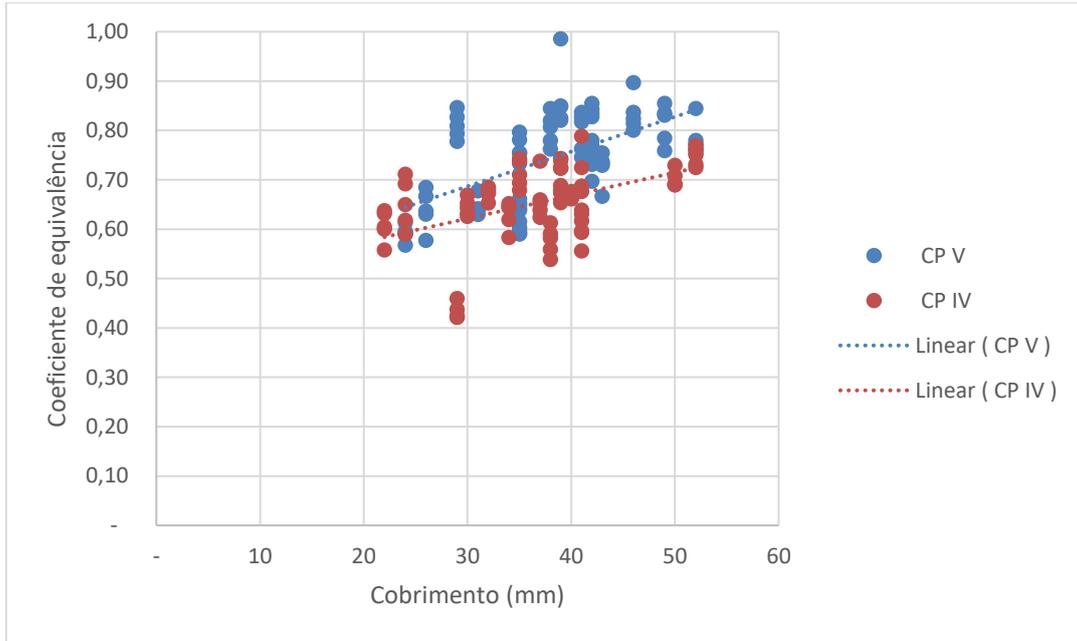


Figura 47 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #1 e #5 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 17 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #2 e #6 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		Variação em relação a 7 Dias	56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência		Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias
24,00	0,45	0,39	-13%	0,38	-2%	0,42	9%
26,00	0,54	0,50	-8%	0,45	-10%	0,52	17%
29,00	0,67	0,64	-3%	0,58	-9%	0,59	1%
31,00	0,58	0,50	-13%	0,48	-5%	0,48	1%
35,00	0,45	0,46	1%	0,43	-5%	0,50	15%
35,00	0,54	0,49	-9%	0,45	-8%	0,52	16%
35,00	0,57	0,63	10%	0,67	7%	0,63	-7%
38,00	0,80	0,70	-13%	0,69	-2%	0,68	-2%
39,00	0,72	0,74	2%	0,67	-9%	0,70	4%
41,00	0,80	0,72	-10%	0,66	-8%	0,70	5%
42,00	0,67	0,54	-18%	0,55	0%	0,55	1%
42,00	0,70	0,68	-3%	0,70	3%	0,68	-3%
43,00	0,67	0,59	-11%	0,57	-4%	0,63	11%
46,00	0,84	0,74	-13%	0,73	0%	0,73	0%
49,00	0,72	0,68	-6%	0,66	-3%	0,68	3%
52,00	0,78	0,67	-15%	0,64	-4%	0,64	1%

Tabela 18 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #2 e #6 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Varição em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Varição em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Varição em relação a 56 Dias	
22,00	0,55	0,46	-16%	0,45	-2%	0,51	13%	
24,00	0,58	0,48	-17%	0,47	-3%	0,50	7%	
29,00	0,39	0,35	-11%	0,33	-6%	0,36	9%	
30,00	0,50	0,51	0%	0,51	0%	0,56	11%	
32,00	0,65	0,52	-20%	0,51	-1%	0,50	-2%	
34,00	0,55	0,53	-3%	0,44	-18%	0,44	1%	
35,00	0,69	0,57	-17%	0,53	-7%	0,57	6%	
37,00	0,63	0,51	-19%	0,51	0%	0,54	6%	
38,00	0,54	0,40	-26%	0,39	-3%	0,40	4%	
39,00	0,57	0,54	-6%	0,55	3%	0,61	9%	
39,00	0,69	0,63	-9%	0,57	-10%	0,57	-1%	
40,00	0,57	0,57	0%	0,56	-2%	0,54	-3%	
41,00	0,52	0,51	-3%	0,46	-9%	0,45	-1%	
41,00	0,71	0,51	-28%	0,50	-3%	0,48	-3%	
50,00	0,71	0,60	-16%	0,63	4%	0,62	-2%	
52,00	0,68	0,64	-7%	0,63	-2%	0,61	-3%	

O gráfico da Figura 48 agrupa todos os resultados das Tabelas 17 e 18.

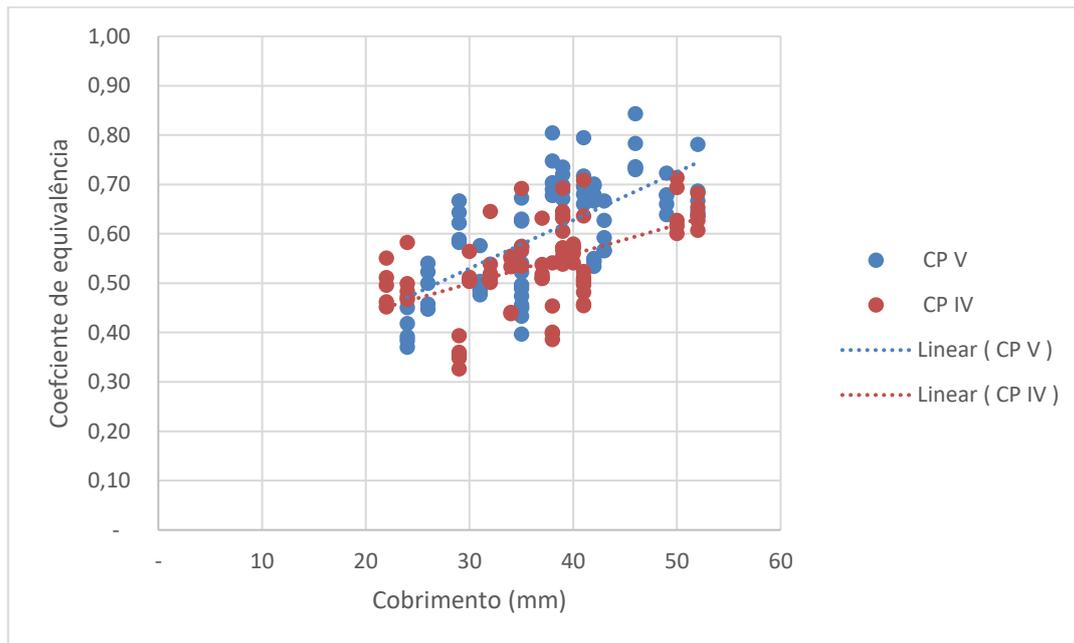


Figura 48 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #2 e #6 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 19 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #3 e #7 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
24,00	0,39	0,33	-16%	0,32	-3%	0,35	9%	
26,00	0,49	0,47	-3%	0,43	-9%	0,49	14%	
29,00	0,57	0,64	13%	0,59	-8%	0,56	-6%	
31,00	0,59	0,50	-15%	0,50	-1%	0,48	-3%	
35,00	0,47	0,45	-3%	0,43	-6%	0,45	4%	
35,00	0,52	0,47	-9%	0,46	-3%	0,48	5%	
35,00	0,56	0,58	4%	0,61	4%	0,60	0%	
38,00	0,81	0,69	-15%	0,72	3%	0,67	-6%	
39,00	0,65	0,73	11%	0,66	-10%	0,64	-2%	
41,00	0,76	0,62	-18%	0,61	-2%	0,66	7%	
42,00	0,64	0,55	-14%	0,54	0%	0,55	0%	
42,00	0,67	0,64	-4%	0,65	1%	0,66	1%	
43,00	0,58	0,60	3%	0,59	-2%	0,60	3%	
46,00	0,81	0,72	-11%	0,67	-7%	0,66	-2%	
49,00	0,64	0,64	0%	0,63	-2%	0,66	4%	
52,00	0,74	0,67	-10%	0,64	-5%	0,66	2%	

Tabela 20 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #3 e #7 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
22,00	0,49	0,44	-11%	0,41	-7%	0,50	23%	
24,00	0,46	0,44	-5%	0,43	-1%	0,46	7%	
29,00	0,34	0,30	-11%	0,32	6%	0,33	5%	
30,00	0,45	0,48	7%	0,50	4%	0,51	3%	
32,00	0,52	0,49	-4%	0,49	-1%	0,45	-7%	
34,00	0,53	0,44	-18%	0,39	-11%	0,39	0%	
35,00	0,62	0,50	-18%	0,50	0%	0,56	11%	
37,00	0,51	0,49	-4%	0,49	0%	0,53	9%	
38,00	0,42	0,38	-10%	0,37	-1%	0,39	6%	
39,00	0,49	0,55	12%	0,56	2%	0,59	5%	
39,00	0,61	0,56	-9%	0,54	-2%	0,55	1%	
40,00	0,54	0,53	-3%	0,52	-1%	0,51	-2%	
41,00	0,47	0,45	-3%	0,44	-3%	0,42	-3%	
41,00	0,58	0,49	-16%	0,47	-3%	0,47	0%	
50,00	0,62	0,54	-12%	0,55	1%	0,55	0%	
52,00	0,59	0,59	1%	0,57	-4%	0,59	3%	

O gráfico da Figura 49 agrupa todos os resultados das Tabelas 19 e 20.

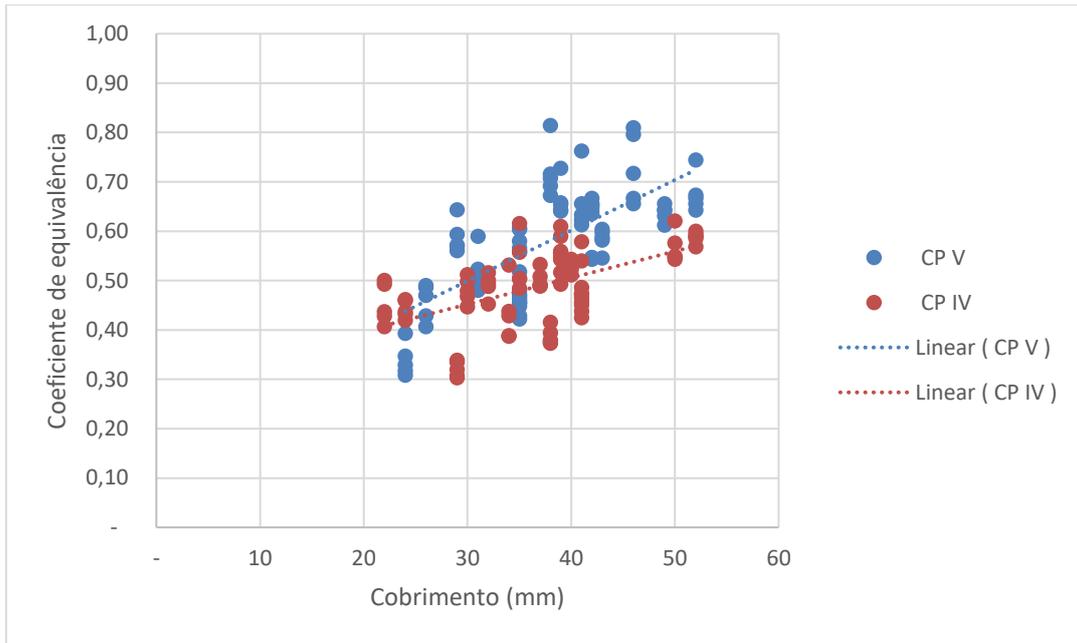


Figura 49 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #3 e #7 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 21 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #4 e #8 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
24,00	0,34	0,32	5%	0,33	2%	0,34	2%	
26,00	0,45	0,44	3%	0,40	-8%	0,45	13%	
29,00	0,59	0,59	0%	0,60	3%	0,58	-4%	
31,00	0,57	0,51	11%	0,50	-2%	0,50	-1%	
35,00	0,47	0,45	4%	0,43	-5%	0,45	5%	
35,00	0,50	0,47	6%	0,46	-2%	0,49	6%	
35,00	0,56	0,58	-3%	0,58	0%	0,58	1%	
38,00	0,75	0,65	15%	0,65	-1%	0,63	-2%	
39,00	0,69	0,69	0%	0,67	-3%	0,66	-1%	
41,00	0,74	0,62	19%	0,59	-5%	0,63	5%	
42,00	0,65	0,57	14%	0,54	-5%	0,56	4%	
42,00	0,67	0,64	4%	0,63	-2%	0,66	5%	
43,00	0,61	0,62	-1%	0,59	-4%	0,58	-2%	
46,00	0,81	0,70	16%	0,68	-2%	0,66	-3%	
49,00	0,62	0,64	-4%	0,65	1%	0,66	2%	
52,00	0,78	0,67	15%	0,63	-6%	0,65	3%	

Tabela 22 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #4 e #8 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
22,00	0,44	0,45	1%	0,43	-5%	0,49	14%	
24,00	0,43	0,41	-3%	0,42	1%	0,46	10%	
29,00	0,31	0,31	3%	0,32	1%	0,33	5%	
30,00	0,44	0,51	14%	0,50	-1%	0,51	1%	
32,00	0,48	0,50	4%	0,49	-2%	0,44	-10%	
34,00	0,43	0,41	-6%	0,38	-7%	0,38	0%	
35,00	0,52	0,48	-7%	0,50	4%	0,52	3%	
37,00	0,50	0,46	-8%	0,50	10%	0,50	0%	
38,00	0,38	0,35	-6%	0,37	4%	0,37	1%	
39,00	0,53	0,54	2%	0,56	4%	0,57	1%	
39,00	0,57	0,54	-7%	0,54	0%	0,52	-4%	
40,00	0,52	0,54	4%	0,52	-4%	0,49	-5%	
41,00	0,45	0,43	-4%	0,41	-3%	0,40	-3%	
41,00	0,56	0,49	-12%	0,48	-2%	0,43	-11%	
50,00	0,57	0,55	-3%	0,52	-6%	0,54	5%	
52,00	0,57	0,60	5%	0,56	-7%	0,56	-1%	

O gráfico da Figura 50 agrupa todos os resultados das Tabelas 21 e 22.

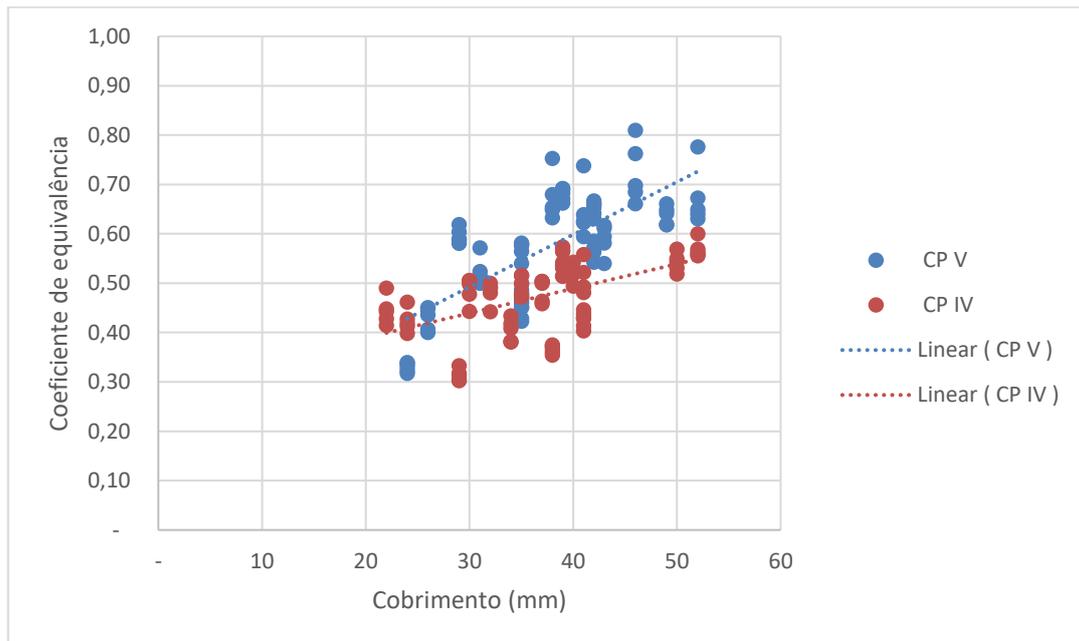


Figura 50 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #4 e #8 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 23 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #9 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
24,00	0,44	0,44	-2%	0,40	-8%	0,42	3%	
26,00	0,52	0,48	-7%	0,44	-8%	0,50	13%	
29,00	0,79	0,83	4%	0,85	2%	0,78	-8%	
31,00	0,61	0,54	-11%	0,50	-8%	0,53	6%	
35,00	0,61	0,60	-2%	0,62	5%	0,60	-4%	
38,00	0,78	0,67	-14%	0,64	-5%	0,69	7%	
41,00	0,80	0,69	-14%	0,64	-7%	0,71	10%	
43,00	0,63	0,65	3%	0,64	-2%	0,73	13%	

Tabela 24 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #9 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
22,00	0,46	0,47	2%	0,49	3%	0,51	6%	
24,00	0,46	0,45	-3%	0,47	4%	0,53	13%	
29,00	0,46	0,44	-5%	0,42	-4%	0,42	1%	
30,00	0,48	0,51	7%	0,51	-1%	0,53	5%	
32,00	0,50	0,52	5%	0,49	-6%	0,49	0%	
34,00	0,42	0,45	6%	0,44	-1%	0,44	0%	
39,00	0,56	0,55	-1%	0,51	-8%	0,53	4%	
41,00	0,59	0,55	-6%	0,51	-7%	0,51	0%	

O gráfico da Figura 51 agrupa todos os resultados das Tabelas 23 e 24.

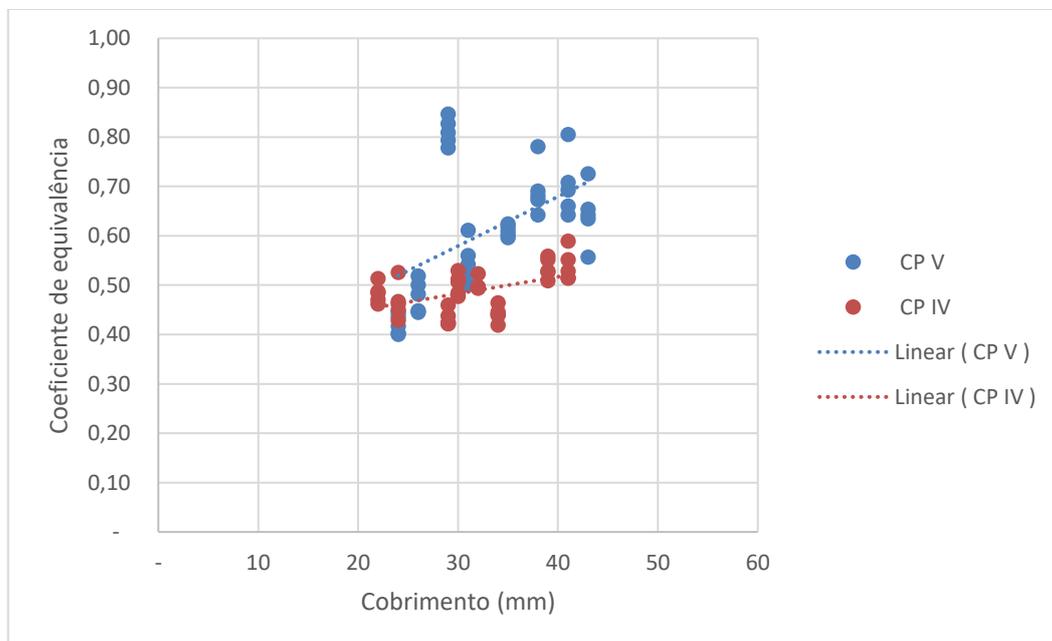


Figura 51 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #9 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 25 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #10 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coefficiente de Equivalência	Coefficiente de Equivalência	Varição em relação a 7 Dias	Coefficiente de Equivalência	Varição em relação a 28 Dias	Coefficiente de Equivalência	Varição em relação a 56 Dias	
24,00	0,42	0,40	-7%	0,39	-3%	0,39	2%	
26,00	0,50	0,49	-2%	0,46	-6%	0,47	4%	
29,00	0,67	0,64	-3%	0,58	-9%	0,59	1%	
31,00	0,60	0,54	-10%	0,54	0%	0,53	-3%	
35,00	0,63	0,64	1%	0,62	-3%	0,63	1%	
38,00	0,79	0,71	-10%	0,71	0%	0,68	-4%	
41,00	0,74	0,62	-17%	0,60	-2%	0,61	1%	
43,00	0,58	0,60	3%	0,57	-5%	0,58	2%	

Tabela 26 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #10 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coefficiente de Equivalência	Coefficiente de Equivalência	Varição em relação a 7 Dias	Coefficiente de Equivalência	Varição em relação a 28 Dias	Coefficiente de Equivalência	Varição em relação a 56 Dias	
22,00	0,44	0,42	-5%	0,43	4%	0,47	8%	
24,00	0,48	0,42	-12%	0,47	11%	0,53	12%	
29,00	0,39	0,35	-11%	0,33	-6%	0,36	9%	
30,00	0,48	0,49	2%	0,51	4%	0,50	-1%	
32,00	0,48	0,51	4%	0,51	1%	0,50	-3%	
34,00	0,44	0,44	-1%	0,40	-8%	0,37	-8%	
39,00	0,59	0,60	2%	0,61	2%	0,58	-6%	
41,00	0,55	0,49	-10%	0,49	0%	0,52	5%	

O gráfico da Figura 52 agrupa todos os resultados das Tabelas 25 e 26.

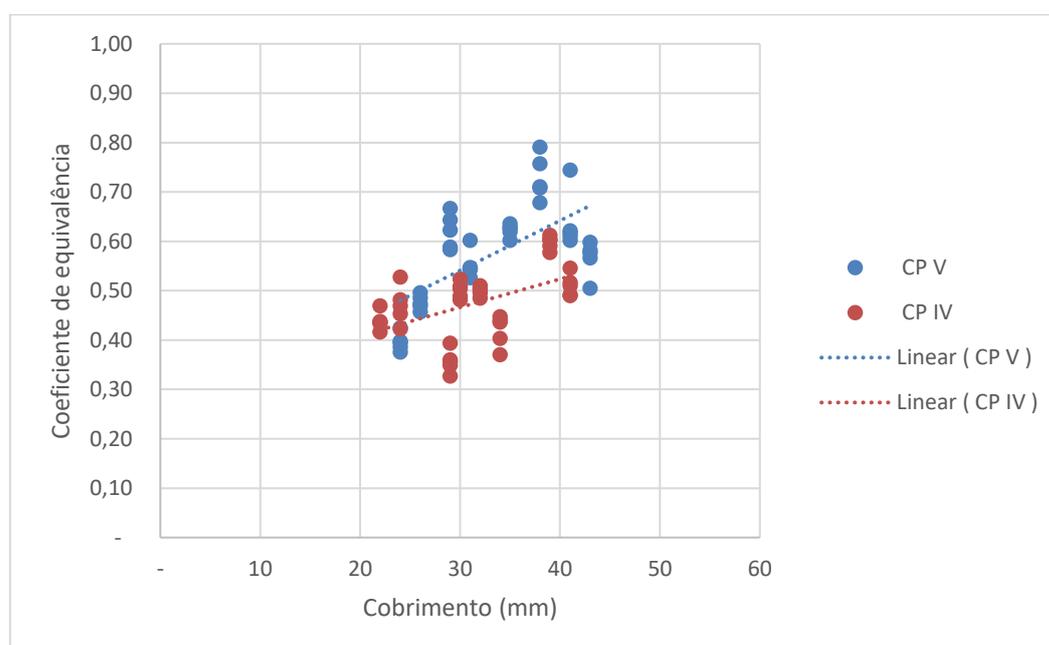


Figura 52 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #10 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 27 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #11 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
24,00	0,44	0,44	0%	0,41	-7%	0,42	2%	
26,00	0,49	0,47	-5%	0,43	-7%	0,47	8%	
29,00	0,57	0,64	13%	0,59	-8%	0,56	-6%	
31,00	0,63	0,58	-8%	0,57	-2%	0,56	-3%	
35,00	0,61	0,62	1%	0,59	-5%	0,63	7%	
38,00	0,77	0,67	-13%	0,59	-13%	0,60	1%	
41,00	0,77	0,62	-20%	0,59	-5%	0,60	1%	
43,00	0,60	0,58	-2%	0,55	-5%	0,58	4%	

Tabela 28 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #11 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
22,00	0,43	0,40	-6%	0,44	8%	0,54	24%	
24,00	0,50	0,48	-3%	0,45	-7%	0,52	16%	
29,00	0,34	0,30	-11%	0,32	6%	0,33	5%	
30,00	0,50	0,52	5%	0,49	-6%	0,47	-5%	
32,00	0,49	0,50	1%	0,50	-1%	0,48	-2%	
34,00	0,42	0,44	5%	0,43	-3%	0,42	-4%	
39,00	0,52	0,56	7%	0,56	0%	0,61	9%	
41,00	0,61	0,51	-17%	0,50	-1%	0,53	6%	

O gráfico da Figura 53 agrupa todos os resultados das Tabelas 27 e 28.

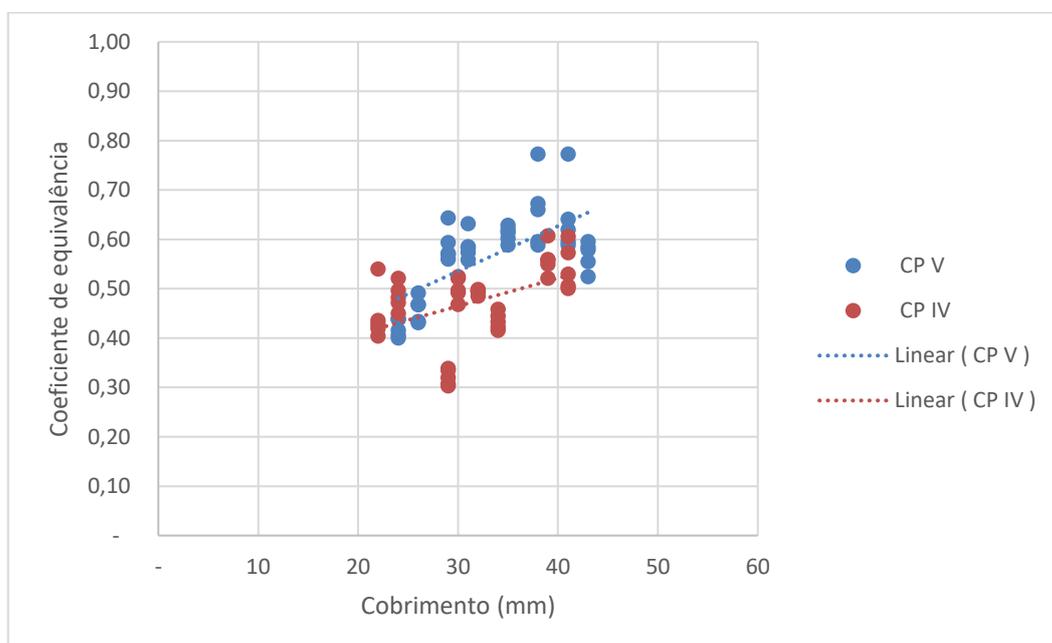


Figura 53 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #11 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 29 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configuração #12 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		Variação em relação a 7 Dias	28 Dias		Variação em relação a 28 Dias	56 Dias		Variação em relação a 56 Dias
	Coefficiente de Equivalência	Coefficiente de Equivalência		Coefficiente de Equivalência	Coefficiente de Equivalência				
24,00	0,58	0,52	-10%	0,43	0,46	-19%	0,46	7%	
26,00	0,57	0,56	-1%	0,54	0,50	-5%	0,50	-6%	
29,00	0,59	0,59	0%	0,60	0,58	3%	0,58	-4%	
31,00	0,70	0,62	-12%	0,60	0,56	-3%	0,56	-6%	
35,00	0,66	0,65	-1%	0,61	0,63	-6%	0,63	3%	
38,00	0,72	0,65	-10%	0,63	0,58	-4%	0,58	-7%	
41,00	0,82	0,68	-17%	0,67	0,66	-2%	0,66	-2%	
43,00	0,58	0,56	-4%	0,55	0,55	-1%	0,55	0%	

Tabela 30 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configuração #12 da Figura 36.

Cobrimento	7 Dias		Variação em relação a 7 Dias	28 Dias		Variação em relação a 28 Dias	56 Dias		Variação em relação a 56 Dias
	Coefficiente de Equivalência	Coefficiente de Equivalência		Coefficiente de Equivalência	Coefficiente de Equivalência				
22,00	0,63	0,47	-26%	0,48	0,53	1%	0,53	12%	
24,00	0,68	0,68	0%	0,55	0,59	-20%	0,59	7%	
29,00	0,31	0,31	3%	0,32	0,33	1%	0,33	5%	
30,00	0,71	0,63	-11%	0,53	0,52	-16%	0,52	-1%	
32,00	0,65	0,57	-12%	0,52	0,57	-9%	0,57	10%	
34,00	0,43	0,46	9%	0,45	0,41	-2%	0,41	-9%	
39,00	0,61	0,61	0%	0,51	0,55	-17%	0,55	8%	
41,00	0,64	0,57	-11%	0,55	0,56	-3%	0,56	0%	

O gráfico da Figura 54 agrupa todos os resultados das Tabelas 29 e 30.

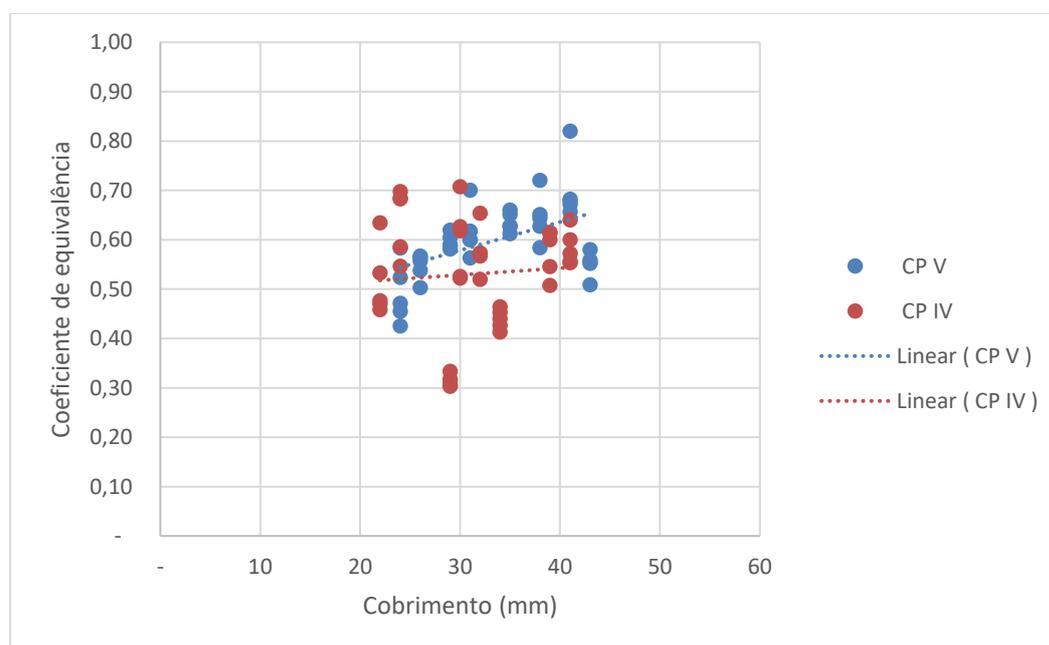


Figura 54 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para a configuração #12 da Figura 36, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 31 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 1 da Figura 46.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
24,00	0,24	0,25	3%	0,27	9%	0,23	-14%	
25,00	0,33	0,30	-8%	0,31	2%	0,32	2%	
25,00	0,32	0,24	-25%	0,29	19%	0,26	-8%	
26,00	0,32	0,29	-9%	0,32	11%	0,32	-1%	
29,00	0,46	0,45	-3%	0,46	2%	0,45	-2%	
31,00	0,39	0,35	-12%	0,36	4%	0,33	-8%	
31,00	0,48	0,45	-6%	0,47	4%	0,50	5%	
33,00	0,46	0,42	-9%	0,45	5%	0,44	0%	
34,00	0,47	0,48	2%	0,49	1%	0,54	10%	
35,00	0,59	0,52	-12%	0,52	1%	0,54	2%	
35,00	0,46	0,48	4%	0,43	-10%	0,47	10%	
38,00	0,59	0,58	-3%	0,53	-7%	0,54	1%	
41,00	0,65	0,58	-11%	0,59	2%	0,58	-3%	
41,00	0,59	0,50	-15%	0,54	8%	0,54	-1%	
43,00	0,70	0,59	-15%	0,59	-1%	0,56	-4%	
43,00	0,53	0,48	-9%	0,50	4%	0,49	-2%	

Tabela 32 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 1 da Figura 46.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
22,00	0,28	0,26	-5%	0,26	-1%	0,26	1%	
24,00	0,33	0,26	-22%	0,28	6%	0,26	-8%	
25,00	0,28	0,26	-8%	0,24	-6%	0,28	15%	
26,00	0,26	0,24	-9%	0,25	3%	0,26	5%	
29,00	0,37	0,37	1%	0,35	-5%	0,36	3%	
29,00	0,22	0,23	6%	0,22	-5%	0,21	-4%	
30,00	0,33	0,35	6%	0,39	10%	0,35	-10%	
30,00	0,24	0,23	-4%	0,23	1%	0,21	-7%	
32,00	0,42	0,40	-3%	0,42	5%	0,40	-6%	
32,00	0,39	0,34	-11%	0,36	5%	0,34	-6%	
33,00	0,40	0,40	0%	0,39	-2%	0,37	-7%	
34,00	0,37	0,36	-3%	0,36	1%	0,33	-8%	
39,00	0,49	0,46	-7%	0,48	4%	0,45	-5%	
40,00	0,53	0,42	-20%	0,43	2%	0,40	-8%	
41,00	0,49	0,44	-11%	0,44	0%	0,42	-4%	
43,00	0,47	0,43	-9%	0,45	3%	0,46	3%	

O gráfico da Figura 56 agrupa todos os resultados das Tabelas 31 e 32.

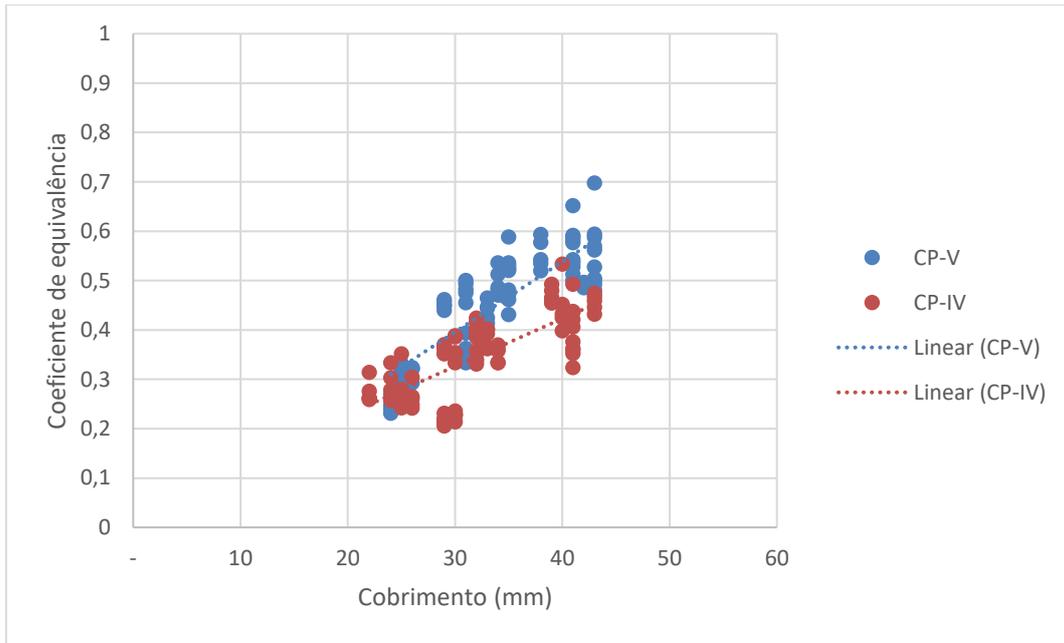


Figura 55 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 1 da Figura 46, considerando todas as idades ensaiadas.

Tabela 33 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP V-ARI, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 2 da Figura 46.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
34,00	0,33	0,28	-17%	0,31	13%	0,32	2%	
35,00	0,38	0,35	-7%	0,36	3%	0,33	-7%	
35,00	0,39	0,33	-15%	0,35	5%	0,38	10%	
35,00	0,36	0,29	-18%	0,34	16%	0,29	-13%	
39,00	0,54	0,52	-2%	0,51	-2%	0,53	4%	
40,00	0,45	0,42	-6%	0,42	0%	0,41	-3%	
40,00	0,48	0,51	6%	0,47	-7%	0,49	3%	
42,00	0,50	0,45	-11%	0,44	-1%	0,45	3%	
42,00	0,49	0,49	-2%	0,49	0%	0,49	1%	
44,00	0,67	0,59	-12%	0,55	-7%	0,53	-4%	
45,00	0,56	0,53	-4%	0,53	0%	0,53	-1%	
46,00	0,61	0,56	-7%	0,54	-4%	0,54	1%	
48,00	0,71	0,60	-15%	0,62	3%	0,61	-2%	
49,00	0,52	0,52	1%	0,54	3%	0,56	4%	
51,00	0,56	0,50	-11%	0,53	7%	0,51	-4%	
52,00	0,66	0,58	-13%	0,55	-4%	0,54	-2%	

Tabela 34 – Coeficientes de equivalência, ao longo do tempo, para os corpos de prova confeccionados com cimento CP IV-RS, configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 2 da Figura 46.

Cobrimento	7 Dias		28 Dias		56 Dias		91 Dias	
	Coeficiente de Equivalência	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 7 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 28 Dias	Coeficiente de Equivalência	Variação em relação a 56 Dias	
35,00	0,34	0,31	-8%	0,32	3%	0,35	10%	
37,00	0,34	0,28	-17%	0,31	10%	0,29	-6%	
37,00	0,37	0,33	-10%	0,35	5%	0,37	5%	
38,00	0,30	0,29	-2%	0,31	9%	0,29	-8%	
39,00	0,36	0,34	-4%	0,34	-2%	0,34	0%	
39,00	0,41	0,43	3%	0,43	1%	0,44	3%	
39,00	0,34	0,33	-3%	0,34	1%	0,32	-6%	
39,00	0,31	0,27	-12%	0,27	-2%	0,26	-2%	
40,00	0,44	0,43	-1%	0,44	2%	0,43	-1%	
41,00	0,42	0,41	-2%	0,41	0%	0,41	1%	
41,00	0,46	0,41	-11%	0,43	5%	0,42	-3%	
41,00	0,38	0,36	-4%	0,35	-2%	0,36	3%	
50,00	0,45	0,44	-3%	0,43	-1%	0,41	-5%	
51,00	0,48	0,45	-7%	0,43	-4%	0,45	5%	
51,00	0,48	0,47	-2%	0,46	-1%	0,46	-1%	
52,00	0,48	0,49	2%	0,48	-3%	0,46	-3%	

O gráfico da Figura 56 agrupa todos os resultados das Tabelas 33 e 34.

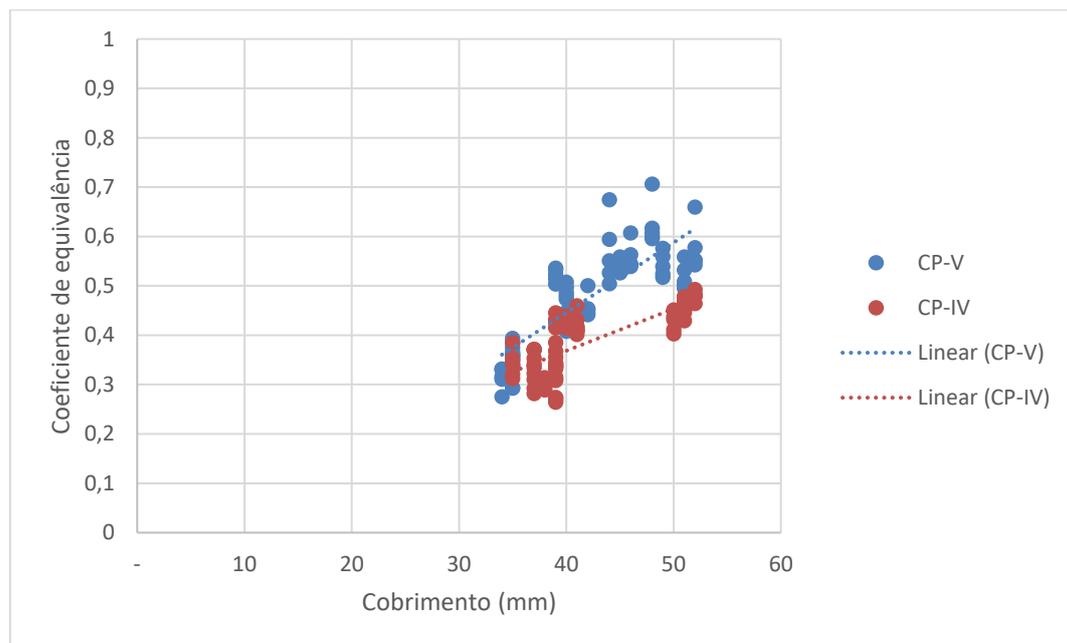


Figura 56 – Gráfico com valores dos coeficientes de equivalência para as configurações #13, #14, #15 e #16 da Figura 36, na posição 2 da Figura 46, considerando todas as idades ensaiadas.

5.3.2 Análise da influência das barras e da posição do equipamento nos coeficientes de equivalência, ao longo do tempo

Pela análise dos resultados obtidos é possível detectar que em todas as medições realizadas nos corpos de prova com presença de barra (em todas as configurações da Figura 36), foi identificada a influência do aço nas medições, seja perpendicular, diagonal ou paralela às barras, apresentando valores de resistividade elétrica superficial medidos inferiores aos valores de referência. Esta constatação converge com as pesquisas analisadas nas referências bibliográficas apresentadas neste estudo.

A redução da resistividade elétrica superficial do concreto, na presença de barras pode ser explicada pela diminuição da corrente elétrica captada pelos eletrodos centrais do aparelho, tendo em vista que a corrente preferencialmente passará pela barra em relação ao concreto. Considerando que parte da corrente elétrica passa pela barra, a corrente elétrica captada pelos eletrodos centrais é reduzida. Sendo os eletrodos centrais uma espécie de voltímetro, quanto menor a corrente captada, menor será a leitura da diferença de potencial. Sabendo que a resistividade elétrica é diretamente proporcional à diferença de potencial, quando há uma redução da diferença de potencial medida, há uma redução da resistividade elétrica superficial medida.

Em relação às tabelas apresentadas, é possível verificar que, a maioria das variações entre as idades ensaiadas encontra-se inferior a 7,5% (desvio aceitável pela AASHTO T358-17) para as medidas de resistividade elétrica superficial. Portanto, tomando como base este parâmetro, esta variação identificada encontra-se dentro da variação esperada e da sensibilidade do equipamento.

Face ao exposto, foram apresentados gráficos que compilaram os coeficientes de equivalência de todas as idades. Foi verificado que nesses gráficos analisados (coeficiente de equivalência x cobrimento), os resultados foram crescentes, ou seja, quanto maior a camada de cobrimento, maior o coeficiente de equivalência. Portanto, quanto maior a camada de cobrimento, menor a influência das barras

nas resistividades medidas. Estes resultados também convergem com as pesquisas analisadas nas referências bibliográficas apresentadas neste estudo.

Foi possível verificar ainda, pela análise dos resultados obtidos, que as configurações perpendiculares às barras, com o centro do aparelho sobre o centro das barras (configurações #1 e #5), apresentaram os menores coeficientes de equivalência, para as duas séries (CP-V-ARI e CP-IV-32-RS) ou seja, apresentaram o menor impacto da presença das barras. Isto significa que, o posicionamento do aparelho perpendicularmente à barra (centro do aparelho no centro da barra) possibilita a medição mais próxima do valor de referência (sem a presença de barras).

Levando-se em consideração o estudo elaborado por Slehi, Ghods e Isgor (2016) – vide subitem 3.7 deste estudo, é possível informar que o resultado obtido nesta dissertação, converge com o resultado obtido pelos referidos pesquisadores, em relação às configurações perpendiculares às barras apresentarem valores de resistividade mais próximos dos valores de referência.

Importante ressaltar que, os resultados obtidos divergem das instruções do manual do aparelho utilizado, tendo em vista que o referido manual informa que na presença de barras de aço, a orientação ótima para realizar a medição seria diagonalmente às barras (vide Figura 2). Entretanto, conforme pode ser analisado nos gráficos apresentados no subitem anterior, as medições realizadas diagonalmente às barras (configuração #9) apresentam coeficientes de equivalência inferiores às configurações realizadas perpendicularmente às barras (configurações #1 e #5). Este fato também foi identificado no estudo elaborado por Slehi, Ghods e Isgor (2016) – vide subitem 3.7.

É possível interpretar que os valores de resistividade elétrica superficial são mais próximos dos de referência quando o aparelho está posicionado perpendicularmente às barras e não diagonalmente às barras, devido à quantidade de barras de aço que estão localizadas próximas aos eletrodos das extremidades, nos quais passam a corrente elétrica aplicada pelo aparelho. Pode-

se inferir que, quanto mais barras próximas aos eletrodos das extremidades, maior será o impacto destas barras, ou seja, mais corrente passará pelas barras e menos corrente passará pelo concreto. No caso do aparelho perpendicular à barra, somente existe uma barra interferindo na medição. Entretanto, no caso do aparelho diagonalmente às barras, existem quatro barras interferindo na medição.

Verificou-se ainda que, as configurações #3, #4, #7 e #8, apresentaram pouca diferença entre si. As configurações #9, #10, #11 e #12, apresentavam coeficientes de equivalência maiores dos que as configurações #3, #4, #7 e #8. Este fato pode ser explicado devido às configurações #3, #4, #7 e #8 estarem com os eletrodos mais próximos das barras do que as configurações #9, #10, #11 e #12.

As configurações #2 e #6 apresentaram menores influências da presença das barras, ao serem comparadas com as configurações #3, #4, #7 e #8, mas apresentaram mais influência da presença das barras, ao serem comparadas com as configurações #1 e #5. Este fato provavelmente foi ocasionado pelas configurações #2 e #6 não estarem posicionadas no centro da malha, mas também não encontra-se exatamente no centro da barra perpendicular.

Com o objetivo de analisar de uma forma quantitativa os valores apresentados no subitem anterior, a Tabela 35 apresenta os coeficientes de equivalência para os cobrimentos de 24 e 41mm, para as duas séries de cimento ensaiadas e considerando as medições realizadas a 91 dias.

Tabela 35 – Coeficientes de equivalência, para as cobrimentos 24 e 41mm.

CPV - 91 dias			CPIV - 91 dias		
Configuração do aparelho	Cobrimento	Coeficiente de Equivalência	Configuração do aparelho	Cobrimento	Coeficiente de Equivalência
#1 e #5		0,59	#1 e #5		0,62
#2 e #6		0,42	#2 e #6		0,50
#3 e #7		0,35	#3 e #7		0,46
#4 e #8	24	0,34	#4 e #8	24	0,46
#9		0,42	#9		0,53
#10		0,39	#10		0,53
#11		0,42	#11		0,52
#12		0,46	#12		0,59
#1 e #5		0,76	#1 e #5		0,65
#2 e #6		0,70	#2 e #6		0,47
#3 e #7		0,66	#3 e #7		0,45
#4 e #8	41	0,63	#4 e #8	41	0,42
#9		0,71	#9		0,51
#10		0,61	#10		0,52
#11		0,60	#11		0,53
#12		0,66	#12		0,56

É possível verificar pela análise da Tabela 35 que em todos os cobrimentos, os valores de coeficiente de equivalência das configurações #1 e #5 foram superiores às demais configurações, convergindo com a análise dos gráficos apresentada anteriormente.

Analisando as medições realizadas sobre as barras, foi possível verificar que foram as medições que obtiveram a maior influência da presença das barras. Estas medições apresentam os menores coeficientes de equivalência (valores mais distantes dos valores de referência).

Verificou-se ainda que, os corpos de prova confeccionados com cimento CP-V-ARI apresentaram influências ligeiramente inferiores da presença das barras (pela análise gráfica), em relação aos corpos de prova confeccionados com o cimento CP-IV-32-RS, ou seja, a resistividade elétrica superficial medida nos corpos de prova com barras, produzidos com CP-V-ARI, encontravam-se mais próximos dos corpos de prova de referência, do que os produzidos com CP-IV-32-RS. Esta constatação é contrária ao esperado, tendo em vista que, conforme constatado inicialmente, os concretos produzidos com o cimento CP-IV-32-RS, apresentam valores de resistividade elétrica superficial superiores aos concretos produzidos com o cimento CP-V-ARI. Portanto, era esperado que a influência da presença

das barras nos corpos de prova produzidos com o cimento CP-IV-32-RS fosse inferior aos corpos de prova produzidos com o cimento CP-V-ARI, pois, conforme a literatura pesquisada, pode-se inferir que a resistividade está diretamente relacionada com a capacidade do concreto suportar a passagem da corrente elétrica. Sendo assim, na teoria, menor corrente elétrica atingiria as barras e os valores dos corpos de prova produzidos com o cimento CP-IV-32-RS estariam mais próximos dos de referência do que os produzidos com CP-V-ARI. Entretanto, com as informações levantadas neste estudo não foi possível diagnosticar uma explicação para estes resultados.

6 CONCLUSÕES

Os corpos de prova de referência (sem barras) confeccionados com cimento CP-V-ARI apresentaram resistividade elétrica superficial inferior aos corpos de prova de referência confeccionados com cimento CP-IV-32-RS. Este efeito provavelmente é provocado pela presença de adições no cimento CP-IV-32-RS (pozolana), que reduzem a permeabilidade do concreto, em comparação com o cimento CP-V-ARI, e aumentam a resistividade elétrica do concreto.

Todas as medições de resistividade elétrica superficial realizadas em corpos de prova com barras foram influenciadas pela presença das barras de aço. De todas as configurações (posição do aparelho nos corpos de prova) analisadas, aquelas que encontravam-se perpendiculares às barras, com o centro do aparelho sobre o centro das barras (configurações #1 e #5), apresentaram os maiores coeficientes de equivalência, para as duas séries (CP-V-ARI e CP-IV-32-RS) ou seja, apresentaram a menor influência das barras. Isto significa que, o posicionamento do aparelho, perpendicularmente à barra (centro do aparelho no centro da barra) possibilita a medição mais próxima do valor de referência (sem barras).

É possível interpretar que os valores de resistividade elétrica superficial são mais próximos dos de referência quando o aparelho está posicionado perpendicularmente às barras, devido à quantidade de barras de aço que estão localizadas próximas aos eletrodos das extremidades, nos quais passam a corrente elétrica aplicada pelo aparelho. Pode-se inferir que, quanto mais barras próximas aos eletrodos das extremidades, maior será o impacto destas barras, ou seja, mais corrente passará pelas barras e menos corrente passará pelo concreto, conseqüentemente, menor será a diferença de potencial medida nos eletrodos centrais e menor a resistividade elétrica superficial.

Em todos os gráficos analisados (coeficiente de equivalência x cobrimento), os resultados foram crescentes, ou seja, quanto maior a camada de cobrimento, maior o coeficiente de equivalência. Portanto, quanto maior a camada de cobrimento, menor a influência das barras nas resistividades medidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORT. T358-17 Standard Test Method for Surface Resistivity Indication of Concretes Ability to Resist Chloride Ion Penetration, Washington, USA, 2017.

ANDRADE, C. Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity. **Conference: International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering**, Evanston, p. 1-8, 2004.

ARENAS-PIEDRAHITA, J. C. et al. Mechanical and durability properties of mortars prepared with untreated sugarcane bagasse ash and untreated fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 69–81, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211 - Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014.

BASHEER, P. A. M. et al. Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to assess their resistance to chloride penetration. **Cement & Concrete Composites**, v. 24, p. 437-449, 2002.

CARINO, N. J. Nondestructive techniques to investigate corrosion status in concrete structures. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, p. 96-106, Agosto 1999.

CHEN, C.-T.; CHANG, J.-J.; YEIH, W.-C. The effects of specimen parameters on the resistivity of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 35-43, 2014.

CHI, J. M.; HUANG, R.; YANG, C. C. Effects of carbonation on mechanical properties and durability of concrete using accelerated testing method. **Journal of Marine Science and Technology**, v. 10, p. 14-20, 2002.

COX, R. N. et al. **COST 509, Corrosion and protection of metals in contact with concrete, Final report**. European Commission, Directorate General Science, Research and Development. Brussels , p. 148. 1997. (EUR 17608 EN, ISBN 92-828-0252-3).

DHANDAPANI, Y. et al. Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC³). **Cement and Concrete Research**, v. 107, p. 136-151, 2018.

DOTD-TR-233-11. Surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration, 2011. 1-6.

EL-ENEIN, S. A. A. et al. Electrical Conductivity of Concrete Containing Silica Fume. **Cement and Concrete Research**, v. 25, p. 1615-1620, 1995.

FERREIRA, G. Estudo sobre fatores influenciadores nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia**, Uberlândia, 2011.

FM5-578. Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability. **Florida Department of Transportation**, Tallahassee, Florida, 2004. 1-4.

GARZON, A. J. et al. Shape factors of four point resistivity method in presence of rebars. In: _____ **Concrete repair, Rehabilitation and Retrofitting III**. London: Taylor and Francis Group, 2012. p. 254-255.

GARZON, A. J. et al. Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars. **Cement & Concrete Composites**, v. 53, p. 249-257, 2014.

GAUTAM, B. P. et al. Effect of coarse aggregate grading on the ASR expansion and damage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 95, p. 75-83, 2017.

GHOSH, P.; TRAN, Q. Influence of parameters on surface resistivity of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 62, p. 134-145, 2015.

GOWERS, K. R.; MILLARD, S. G. Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion. **ACI Materials Journal**, p. 537-541, September-October 1999.

HELENE, P. R. D. L. Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado, Tese (Livre Docencia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 231, 1993.

HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate – A literature review. **Cement & Concrete Composites**, v. 39, p. 60-72, 2013.

HOSSAIN, K. M. A.; LACHEMI, M. Corrosion resistance and chloride diffusivity of volcanic ash blended cement mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 695-702, 2004.

LAYSSI, H. et al. Electrical Resistivity of Concrete, Concepts, applications, and measurement techniques. **Concrete International**, p. 41-46, Maio 2015.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11-16, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª. ed. São Paulo, Brasil: IBRACON, 2008.

MORSHED, A. Z.; AZAR, A.; SHAO, Y. Characterising cement carbonation curing using non-contact electrical resistivity measurement. **Advances in Cement Research**, v. 27(4), p. 214-224, 2015.

NGUYEN, A. Q. et al. Evaluation of water content gradient using a new configuration of linear array four-point probe for electrical resistivity measurement. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 308-322, 2017.

NOUSHINI, A.; CASTEL, A. The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 464–477, 2016.

PÉREZ, E. W. R. Influência da idade e cura do concreto na resistividade elétrica, Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, p. 94, 2015.

POLDER, R. B. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation. **Construction and Building Materials**, v. 15, p. 125-131, 2001.

POLDER, R. B.; PEELEN, W. H. A. Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity. **Cement & Concrete Composites**, 2002. v24 - p427-435.

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

PROCEQ. **Resipod family**: Instruções de operação - Teste de durabilidade do concreto. [S.l.]: [s.n.], 2017.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; GHAHARI, S. A.; ESMAEILI, M. Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 138-146, 2014.

SALEHI, M.; GHODS, P.; ISGOR, O. B. Numerical investigation of the role of embedded reinforcement mesh on electrical resistivity measurements of concrete using the Wenner probe technique. **Materials and Structures**, v. 49, p. 301-316, 2016.

SANCHEZ, J. et al. Determination of reinforced concrete durability with on-site resistivity measurements. **Materials and Structures**, v. 50 (1), p. 1-9, 2017.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto, Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil) - Universidade Nacional de Brasília, Brasília, p. 161, 2006.

SENGUL, O.; GJØRV, O. E. Effect of Embedded Steel on Electrical Resistivity Measurements on Concrete Structures. **ACI Materials Journal**, p. 11-18, Janeiro-Fevereiro 2009.

SHUBBAR, A. A. et al. The development of a low carbon binder produced from the ternary blending of cement, ground granulated blast furnace slag and high calcium fly ash: An experimental and statistical approach. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 1051-1060, 2018.

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

SPRAGG, R. et al. Leaching of conductive species: Implications to measurements of electrical resistivity. **Cement and Concrete Composites**, v. 79, p. 94-105, 2017.

TENG, S.; LIM, T. Y. D.; DIVSHOLI, B. S. Durability and mechanical properties of high strength concrete incorporating ultra fine Ground Granulated Blast-furnace Slag. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 875–881, 2013.

WANG, X. et al. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 439–452, 2014.

WEYDERT, R.; GEHLEN, C. Durability of Building Materials and Components 8. Ottawa ON, K1A 0R6, Canadá: Institute for Research in Construction, 1999. Cap. Electrolytic Resistivity of Cover Concrete: Relevance, Measurement and Interpretation, p. 409-419.

WEYDERT, R.; GEHLEN, C. Durability of Building Materials and Components 8. Ottawa ON, K1A 0R6, Canadá: Institute for Research in Construction, 1999. p. 409-419.

APÊNDICE

Corpos de Prova confeccionados com o Cimento CP IV - RS							
Configuração	CP	Cobrimento (mm)	Resistividade (kΩcm) - Mediana				
			7 Dias	21 Dias	28 Dias	56 Dias	91 Dias
#1		50	4,60	9,30	10,00	14,30	17,00
#2		50	4,50	8,50	8,20	12,20	14,90
#3		50	4,00	7,20	7,60	10,90	13,30
#4		50	3,70	6,80	7,70	10,40	13,20
#5		41	5,20	9,20	10,10	13,00	16,70
#6		41	4,50	7,80	7,30	10,10	11,80
#7	1 - Face Superior	41	3,70	6,80	7,00	9,50	11,60
#8		41	3,60	6,50	7,00	9,60	10,70
#9		41	3,80	6,60	7,80	10,30	12,50
#10		41	3,60	6,50	7,10	9,60	12,70
#11		41	4,30	7,50	7,50	10,40	13,00
#12		41	4,80	9,00	9,50	13,20	15,90
#13		40	3,60	5,60	6,40	8,50	11,60
#14		51	3,20	5,90	6,50	9,60	11,70
#15		41	3,20	5,60	6,30	8,70	10,20
#16		50	3,00	5,60	6,50	8,50	10,20
#1	1 - Face Inferior	22	4,30	8,40	9,40	12,30	16,40
#2		22	3,50	6,20	6,50	9,00	12,50
#3		22	3,20	5,30	6,20	8,00	12,40
#4		22	2,90	5,20	6,30	8,50	12,20
#5		37	5,20	8,70	9,80	13,50	17,80
#6		37	4,20	6,50	7,30	10,30	13,70

#7	37	3,30	6,10	6,90	9,70	13,10
#8	37	3,20	5,80	6,60	10,00	12,70
#9	22	3,00	6,10	6,80	9,80	12,60
#10	22	2,90	5,60	6,30	8,70	12,10
#11	22	3,10	5,60	6,20	9,30	14,20
#12	22	5,20	6,90	8,10	11,60	16,00
#13	37	2,30	3,70	4,60	6,30	8,50
#14	26	1,80	3,20	3,80	5,60	8,40
#15	37	2,50	4,40	5,40	8,10	10,30
#16	22	1,90	3,40	4,00	5,80	8,70
#1	52	5,00	9,70	10,60	15,00	18,50
#2	52	4,30	8,00	8,70	12,20	14,70
#3	52	3,80	7,50	8,30	11,30	14,20
#4	52	3,70	7,20	8,40	11,20	13,50
#5	39	4,90	8,60	9,90	13,30	17,90
#6	39	4,40	7,80	9,00	11,60	13,90
#7	39	3,90	7,00	8,00	10,90	13,40
#8	39	3,70	6,40	7,60	10,70	12,80
#9	39	3,60	6,60	7,80	10,20	12,80
#10	39	3,90	7,70	8,70	12,00	14,20
#11	39	3,70	7,20	8,30	11,60	14,90
#12	39	4,60	9,00	10,20	12,10	15,60
#13	43	3,20	5,70	6,60	9,80	12,00
#14	51	3,20	6,20	7,00	9,70	12,30
#15	39	3,20	5,90	6,90	9,40	11,70

2 - Parte Superior

#16		52	3,20	6,30	7,20	9,60	12,20
#1		24	4,80	9,20	10,10	13,00	16,90
#2		24	3,70	5,90	6,80	9,30	12,20
#3		24	3,00	5,20	6,20	8,50	11,40
#4		24	2,80	5,00	5,80	8,30	11,50
#5		35	5,20	9,80	10,65	14,70	19,40
#6		35	4,60	7,20	8,20	10,80	14,40
#7	2 - Parte Inferior	35	4,00	6,00	7,10	10,00	13,70
#8		35	3,30	5,90	6,90	9,90	13,00
#9		24	3,00	5,40	6,50	9,40	12,90
#10		24	3,20	5,80	6,40	9,40	13,60
#11		24	3,60	6,30	7,40	9,60	13,70
#12		24	5,60	10,50	11,80	13,30	17,60
#13		39	2,40	4,50	5,00	7,30	9,70
#14		25	1,90	3,40	3,70	6,00	9,70
#15		35	2,30	4,10	4,90	7,70	10,70
#16		24	2,30	3,40	4,30	5,70	8,40
#1		40	4,30	8,60	9,80	13,80	16,30
#2		40	3,60	7,10	7,80	10,90	13,10
#3	3 - Parte Superior	40	3,50	6,70	7,40	10,40	12,40
#4		40	3,40	6,70	7,60	10,40	12,00
#5		32	4,50	8,70	9,60	13,80	16,60
#6		32	4,10	6,60	7,40	10,40	12,30
#7		32	3,30	6,30	7,10	9,80	11,10
#8		32	3,10	6,10	7,10	9,80	11,00

#9		32	3,20	6,20	7,40	9,90	12,00
#10		32	3,20	6,40	7,30	10,00	12,20
#11		32	3,50	6,50	7,40	10,30	11,90
#12		32	4,90	8,50	9,50	12,40	16,40
#13		33	2,70	5,30	5,80	7,80	9,30
#14		41	2,80	5,40	6,20	8,80	10,60
#15		32	2,70	5,20	6,10	8,20	9,90
#16		40	2,90	5,50	6,60	9,00	10,50
#1		30	4,40	8,40	10,00	13,80	18,30
#2		30	3,20	6,40	7,10	10,10	13,80
#3		30	2,90	5,80	6,80	9,80	12,70
#4		30	2,90	6,00	7,10	9,90	12,60
#5		39	5,10	9,80	11,10	16,00	18,80
#6		39	3,80	8,10	7,70	11,20	15,40
#7	3 - Parte Inferior	39	3,20	6,40	7,75	11,10	14,50
#8		39	3,40	6,70	7,80	11,20	14,30
#9		30	3,10	6,10	7,40	10,20	13,00
#10		30	3,20	6,70	7,40	10,20	13,00
#11		30	3,60	7,00	8,00	10,50	12,30
#12		30	5,80	9,30	10,80	12,80	15,70
#13		41	3,10	5,40	6,40	9,00	10,60
#14		29	2,50	4,90	5,40	7,80	9,70
#15		39	2,80	5,60	6,60	9,70	10,70
#16		30	2,30	4,60	6,00	7,80	10,70
#1	Parte Super	41	6,50	12,75	14,50	20,70	24,65

#2	41	6,30	12,25	13,65	19,45	24,20
#3	41	6,45	12,50	14,00	19,90	24,25
#4	41	6,50	12,80	14,00	20,05	24,30
#5	34	6,60	12,70	14,70	20,35	24,70
#6	34	6,35	12,25	14,25	20,30	24,50
#7	34	6,40	12,60	14,40	20,10	24,55
#8	34	6,45	12,45	14,20	19,95	24,85
#9	34	6,45	12,50	14,15	20,05	24,30
#10	34	6,60	12,75	14,45	19,60	24,60
#11	34	7,10	13,10	14,85	20,80	24,55
#12	34	7,50	15,00	16,60	23,85	28,60
#13	32	6,75	13,20	14,80	21,35	25,70
#14	39	6,70	13,25	15,15	21,25	25,95
#15	34	6,50	12,85	14,40	20,70	25,15
#16	41	6,65	12,80	15,05	20,70	25,35
#1	29	3,10	5,60	6,80	9,30	11,60
#2	29	2,50	4,50	4,90	6,50	8,70
#3	29	2,20	3,80	4,30	6,30	8,30
#4	29	2,00	3,80	4,40	6,30	8,30
#5	38	4,10	7,80	9,40	12,10	14,70
#6	38	3,60	5,70	5,70	7,80	10,20
#7	38	2,70	4,70	5,30	7,40	9,70
#8	38	2,40	4,50	5,10	7,30	9,40
#9	29	2,20	4,40	4,90	6,60	8,30
#10	29	2,20	4,30	4,80	6,50	8,00

4 - Parte Inferior

#11		29	2,90	5,20	6,00	7,30	8,70
#12		29	4,50	6,90	8,00	11,00	12,00
#13		39	2,10	3,60	4,00	5,70	7,20
#14		30	1,60	3,00	3,50	4,60	6,30
#15		38	2,00	3,80	4,80	6,30	8,40
#16		29	1,50	3,00	3,40	4,70	5,70
#1			6,70	13,50	15,20	22,40	26,50
#2			6,50	12,80	14,30	20,50	26,20
#3			6,60	13,30	15,00	21,50	26,40
#4			6,70	13,40	15,10	21,80	26,40
#5			7,00	13,30	16,00	22,50	27,40
#6			6,50	13,00	15,20	22,00	26,80
#7	5 - Parte Superior		6,50	13,40	15,40	21,60	27,00
#8		N/A	6,70	13,40	15,40	21,50	26,50
#9			6,60	13,30	15,00	21,80	26,40
#10			6,60	13,20	15,40	21,10	26,20
#11			7,40	13,70	15,80	22,30	26,40
#12			7,50	15,60	17,60	25,10	30,10
#13			6,90	14,10	15,70	23,50	28,20
#14			6,70	14,10	16,30	23,30	28,40
#15			6,60	13,40	15,30	22,20	27,60
#16			7,00	13,60	16,60	22,30	27,60
#1	5 - Parte Inferior		6,70	13,80	15,90	22,60	27,80
#2		N/A	6,50	13,40	15,30	21,10	26,30
#3			6,60	13,30	15,30	21,30	27,50

#4		6,60	13,20	14,80	20,90	26,60	
#5		6,70	13,70	16,30	22,50	29,80	
#6		6,40	13,00	15,30	21,80	27,90	
#7		6,50	12,90	14,80	20,90	26,70	
#8		6,40	13,00	15,20	21,10	27,50	
#9		6,50	13,00	15,10	21,60	25,70	
#10		6,60	13,50	16,50	21,40	28,60	
#11		6,80	14,30	16,50	23,50	29,60	
#12		7,60	15,70	18,00	25,30	33,70	
#13		6,80	14,10	16,10	23,30	28,20	
#14		6,70	13,70	16,20	23,40	30,70	
#15		6,80	13,60	16,10	23,40	30,30	
#16		7,00	13,80	16,30	24,00	30,30	
#1		6,30	12,00	13,80	19,00	22,80	
#2		6,10	11,70	13,00	18,40	22,20	
#3		6,30	11,70	13,00	18,30	22,10	
#4		6,30	12,20	12,90	18,30	22,20	
#5	6 - Parte Superior	6,20	12,10	13,40	18,20	22,00	
#6		N/A	6,20	11,50	13,30	18,60	22,20
#7		6,30	11,80	13,40	18,60	22,10	
#8		6,20	11,50	13,00	18,40	23,20	
#9		6,30	11,70	13,30	18,30	22,20	
#10		6,60	12,30	13,50	18,10	23,00	
#11		6,80	12,50	13,90	19,30	22,70	
#12		7,50	14,40	15,60	22,60	27,10	

#13			6,60	12,30	13,90	19,20	23,20
#14			6,70	12,40	14,00	19,20	23,50
#15			6,40	12,30	13,50	19,20	22,70
#16			6,30	12,00	13,50	19,10	23,10
#1			6,80	12,80	15,20	21,50	26,90
#2			6,20	11,60	12,80	18,70	22,60
#3			6,40	11,50	13,10	18,10	22,10
#4			6,50	11,90	13,30	18,80	23,20
#5			7,40	12,70	14,40	20,80	24,80
#6			6,90	12,10	13,30	18,60	23,00
#7	6 - Parte Inferior		6,50	11,90	13,40	18,80	22,50
#8		N/A	6,40	12,00	13,60	18,60	22,90
#9			6,50	12,20	13,80	18,70	23,40
#10			6,70	12,10	13,80	18,70	23,00
#11			7,70	12,40	14,20	19,20	23,00
#12			8,80	14,40	16,50	23,40	26,40
#13			6,70	12,20	13,60	19,90	24,60
#14			6,90	12,80	14,40	19,70	24,50
#15			6,70	12,70	14,50	20,20	25,30
#16			6,80	12,20	14,60	20,40	25,20

Corpos de Prova confeccionados com o Cimento CP V - ARI							
Configuração	CP	Cobrimento (mm)	Resistividade (kΩcm) - Mediana				
			7 Dias	14 Dias	28 Dias	56 Dias	91 Dias
#1		41	3,60	3,80	4,60	4,70	4,50
#2		41	3,30	3,30	3,80	3,60	4,00
#3		41	3,20	3,10	3,30	3,40	3,80
#4		41	3,10	3,10	3,30	3,30	3,60
#5		52	3,80	4,00	4,40	4,60	4,60
#6		52	3,40	3,40	3,60	3,60	3,80
#7	1 - Face Superior	52	3,20	3,30	3,60	3,50	3,80
#8		52	3,30	3,20	3,60	3,50	3,80
#9		41	3,30	3,20	3,60	3,50	4,00
#10		41	3,20	3,20	3,30	3,40	3,60
#11		41	3,40	3,30	3,50	3,50	3,60
#12		41	4,10	4,00	4,40	4,50	4,50
#13		48	3,00	3,00	3,30	3,40	3,60
#14		43	3,00	3,00	3,20	3,20	3,50
#15		52	3,00	3,00	3,20	3,20	3,50
#16		41	2,90	3,00	3,40	3,40	3,30
#1	1 - Face Inferior	35	4,00	4,20	4,90	4,80	5,20
#2		35	3,00	3,20	3,50	3,40	4,00
#3		35	2,90	3,00	3,30	3,30	3,60
#4		35	2,80	3,00	3,20	3,20	3,60
#5		26	3,90	4,20	4,60	4,60	4,50
#6		26	3,00	3,00	3,40	3,20	3,90
#7		26	2,60	2,60	3,10	3,00	3,50

#8	26	2,40	2,50	2,90	2,80	3,20
#9	26	2,80	2,80	3,20	3,20	3,60
#10	26	2,80	3,00	3,30	3,20	3,60
#11	26	2,80	2,80	3,20	3,10	3,60
#12	26	3,40	3,90	4,20	4,30	4,20
#13	25	2,00	2,10	2,30	2,40	2,60
#14	35	2,10	2,30	2,50	2,40	2,70
#15	26	1,80	1,90	2,20	2,40	2,50
#16	35	2,30	2,30	2,60	3,00	3,00
#1	49	3,30	4,00	4,70	4,80	4,90
#2	49	3,00	3,10	3,60	3,60	3,90
#3	49	2,70	3,00	3,40	3,50	3,80
#4	49	2,60	3,00	3,40	3,60	3,80
#5	43	3,30	3,50	4,20	4,30	4,60
#6	43	2,90	2,80	3,20	3,20	3,70
#7	43	2,50	2,70	3,20	3,20	3,50
#8	43	2,60	2,70	3,30	3,30	3,40
#9	43	2,60	2,70	3,40	3,50	4,10
#10	43	2,50	2,60	3,20	3,20	3,40
#11	43	2,62	2,70	3,30	3,30	3,50
#12	43	2,90	3,00	3,60	3,70	3,80
#13	41	2,50	2,50	2,90	3,00	3,10
#14	51	2,40	2,50	2,90	2,90	3,10
#15	43	2,40	2,50	2,90	2,90	3,20
#16	49	2,30	2,70	3,10	3,30	3,60

2 - Parte Superior

#1		24	3,60	4,00	4,60	4,60	4,80
#2		24	2,50	2,50	2,80	2,90	3,20
#3		24	2,20	2,00	2,30	2,30	2,60
#4		24	1,90	2,00	2,20	2,30	2,50
#5		35	3,70	3,90	4,40	4,40	4,60
#6		35	2,50	2,60	3,10	3,10	3,70
#7	2 - Parte Inferior	35	2,50	2,70	3,00	3,00	3,20
#8		35	2,50	2,60	3,00	3,00	3,20
#9		24	2,40	2,50	2,90	2,90	3,00
#10		24	2,40	2,40	2,70	2,70	3,00
#11		24	2,50	2,60	3,00	2,90	3,20
#12		24	3,50	3,30	3,90	3,40	3,80
#13		34	2,00	1,90	2,30	2,40	2,60
#14		25	1,80	1,60	2,00	1,90	2,40
#15		35	2,00	1,90	2,30	2,20	2,60
#16		24	1,40	1,70	2,00	1,80	2,20
#1		46	3,90	4,20	4,60	4,60	4,80
#2		46	3,50	3,80	3,90	4,00	4,20
#3	3 - Parte Superior	46	3,40	3,90	3,80	3,70	3,80
#4		46	3,40	3,70	3,70	3,80	3,80
#5		38	3,80	4,00	4,60	4,60	5,00
#6		38	3,50	3,70	3,80	3,90	4,00
#7		38	3,50	3,50	3,70	3,90	3,90
#8		38	3,20	3,40	3,50	3,60	3,70
#9		38	3,20	3,30	3,50	3,50	3,90

#10		38	3,40	3,90	3,80	4,00	4,00
#11		38	3,40	3,40	3,80	3,50	3,60
#12		38	3,60	3,80	4,20	4,20	4,00
#13		35	2,50	2,60	2,80	3,00	3,20
#14		44	2,90	3,00	3,00	3,00	3,10
#15		38	2,70	3,00	3,10	3,20	3,30
#16		46	2,70	2,90	3,10	3,20	3,40
#1		31	4,10	4,50	4,80	5,00	5,10
#2		31	3,20	3,30	3,60	3,60	3,70
#3		31	3,30	3,40	3,50	3,60	3,60
#4		31	3,20	3,30	3,50	3,50	3,70
#5		42	4,30	4,60	5,30	5,40	5,70
#6		42	3,70	3,50	3,70	3,90	4,10
#7	3 - Parte Inferior	42	3,40	3,50	3,60	3,80	3,90
#8		42	3,50	3,60	3,80	3,80	4,00
#9		31	3,30	3,50	3,60	3,60	3,80
#10		31	3,40	3,50	3,70	3,80	4,00
#11		31	3,60	3,80	4,00	4,10	4,30
#12		31	4,20	4,20	4,60	4,80	4,70
#13		40	2,70	2,90	3,10	3,10	3,30
#14		33	2,60	2,80	3,10	3,20	3,10
#15		42	2,80	2,90	3,00	3,40	3,50
#16		31	2,30	2,40	2,70	2,60	2,90
#1	4 - Parte Superior	42	4,35	5,10	5,50	5,75	5,90
#2		42	4,15	4,85	5,30	5,45	5,75

#3	42	4,20	4,90	5,30	5,55	5,80
#4	42	4,20	4,85	5,30	5,55	5,75
#5	35	4,50	5,25	5,70	5,90	6,10
#6	35	4,35	4,95	5,40	5,65	5,90
#7	35	4,30	4,95	5,35	5,45	5,80
#8	35	4,25	5,00	5,35	5,55	5,85
#9	35	4,10	4,85	5,20	5,45	5,65
#10	35	4,30	5,15	5,35	5,65	5,90
#11	35	4,40	5,15	5,65	5,95	6,05
#12	35	5,00	5,90	6,45	6,70	6,85
#13	34	4,25	5,00	5,35	5,60	6,05
#14	45	4,30	5,05	5,45	5,70	6,15
#15	35	4,55	5,20	5,80	5,90	6,35
#16	42	4,45	5,15	5,75	5,90	6,25
#1	29	4,80	5,70	6,20	6,60	6,30
#2	29	3,70	4,20	4,60	4,40	4,50
#3	29	3,20	3,70	4,50	4,30	4,20
#4	29	3,30	3,90	4,00	4,20	4,30
#5	39	4,70	5,60	6,80	6,20	6,40
#6	39	4,00	4,50	5,00	4,80	5,20
#7	39	3,50	4,10	4,80	4,60	4,60
#8	39	3,70	4,20	4,60	4,70	4,70
#9	29	3,50	4,20	4,70	4,70	4,60
#10	29	3,80	4,10	4,30	4,50	5,10
#11	29	3,60	4,10	4,50	4,60	4,80

4 - Parte Inferior

#12		29	4,20	4,90	5,40	5,60	6,00
#13		40	2,90	3,50	3,50	3,70	3,90
#14		31	2,70	3,00	3,30	3,60	3,70
#15		39	3,00	3,40	3,50	4,00	3,90
#16		29	2,70	3,10	3,40	3,50	3,60
#1			4,10	4,80	5,00	5,30	5,40
#2			4,00	4,60	5,10	5,10	5,40
#3			4,10	4,60	5,00	5,20	5,40
#4			4,00	4,60	5,00	5,20	5,40
#5			4,10	4,80	5,10	5,20	5,50
#6			3,90	4,30	4,70	4,90	5,20
#7	5 - Parte Superior		3,90	4,40	4,90	4,90	5,20
#8		N/A	3,90	4,60	5,00	5,10	5,40
#9			4,00	4,60	5,10	5,20	5,40
#10			4,00	4,60	4,90	5,10	5,20
#11			4,00	4,70	5,30	5,50	5,40
#12			4,60	5,30	6,30	6,30	6,40
#13			4,40	5,00	5,30	5,60	6,20
#14		4,10	4,70	5,10	5,30	6,00	
#15		4,10	4,60	5,10	5,20	5,60	
#16		4,30	4,90	5,50	5,50	5,80	
#1	5 - Parte Inferior		6,00	6,90	7,40	7,70	7,80
#2		N/A	5,80	6,80	7,20	7,50	7,70
#3			6,00	6,90	7,30	7,50	7,70
#4			5,80	6,40	7,20	7,20	7,60

#5			6,20	7,20	7,10	7,50	8,20
#6			5,80	6,80	7,00	7,40	7,50
#7			5,70	6,80	6,80	7,20	7,30
#8			5,60	6,40	6,90	7,20	7,20
#9			5,70	6,40	6,80	7,30	7,30
#10			6,20	7,00	7,20	7,30	7,80
#11			6,20	7,20	7,20	7,50	7,90
#12			6,40	7,20	7,90	8,30	8,80
#13			5,90	7,00	7,30	7,50	7,80
#14			5,90	6,90	7,40	7,70	7,80
#15			6,10	6,90	7,20	8,20	8,50
#16			6,00	7,00	7,50	8,00	8,60
#1			4,60	5,40	6,00	6,20	6,40
#2			4,30	5,10	5,50	5,80	6,10
#3			4,30	5,20	5,60	5,90	6,20
#4			4,40	5,10	5,60	5,90	6,10
#5			4,90	5,70	6,30	6,60	6,70
#6	6 - Parte Superior		4,80	5,60	6,10	6,40	6,60
#7		N/A	4,70	5,50	5,80	6,00	6,40
#8			4,60	5,40	5,70	6,00	6,30
#9			4,20	5,10	5,30	5,70	5,90
#10			4,60	5,70	5,80	6,20	6,60
#11			4,80	5,60	6,00	6,40	6,70
#12			5,40	6,50	6,60	7,10	7,30
#13			4,10	5,00	5,40	5,60	5,90

#14			4,50	5,40	5,80	6,10	6,30
#15			5,00	5,80	6,50	6,60	7,10
#16			4,60	5,40	6,00	6,30	6,70
#1			6,10	7,20	7,60	7,90	8,40
#2			5,30	6,70	7,10	7,60	7,60
#3			5,20	6,10	6,70	7,00	7,30
#4			5,40	6,20	6,40	6,70	7,20
#5			5,20	6,00	6,70	7,10	7,40
#6			5,30	6,30	6,60	6,90	7,40
#7	6 - Parte Inferior		5,00	6,00	6,40	6,80	7,00
#8		N/A	5,10	5,90	6,40	6,80	7,00
#9			5,10	6,10	6,50	7,10	7,10
#10			5,10	5,80	6,40	6,70	7,40
#11			5,20	5,80	6,50	6,80	7,50
#12			5,60	6,80	7,00	7,70	7,90
#13			6,20	6,80	7,50	7,70	7,90
#14			5,30	6,30	6,50	6,70	7,20
#15			5,10	6,10	6,40	6,80	7,00
#16			5,70	6,80	7,40	7,60	7,80