



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

ESTUDO DE CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DO CONCRETO E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Por

Carla Cavalcante Araújo

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de Mestre

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2018



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E

AMBIENTAL

– MESTRADO –

ESTUDO DE CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DO CONCRETO E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Carla Cavalcante Araújo

Orientador: Prof. Dr. Gibson Rocha Meira

João Pessoa – Paraíba

Setembro de 2018

A663e Araujo, Carla Cavalcante.

Estudo de correlações entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos / Carla Cavalcante Araujo. -

João Pessoa, 2018.

148 f. : il.

Orientação: Gibson Rocha Meira.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Concreto. 2. Ensaaios não destrutivos. 3. Curvas de correlação. I. Meira, Gibson Rocha. II. Título.

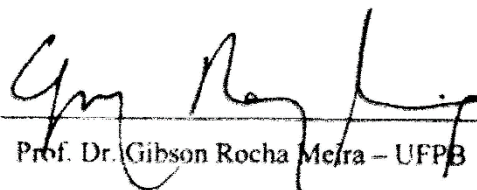
UFPB/BC

CARLA CAVALCANTE ARAÚJO

**ESTUDO DE CORRELAÇÕES ENTRE PROPRIEDADES DO
CONCRETO E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Dissertação aprovada em 28/09/2018 como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba.

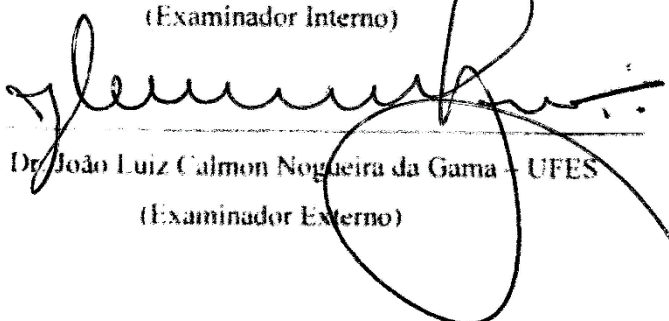
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Gibson Rocha Meira – UFPB
(Orientador)



Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa – UFPB
(Examinador Interno)



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama – UFES
(Examinador Externo)

Dedico essa dissertação à Deus e aos meus pais, Eliete e Carlos Augusto, os quais sempre me deram força para alcançar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pela perseverança, força e saúde concedidas para que eu pudesse finalizar mais esta etapa da minha vida. Além das inúmeras bênçãos inesperadas no decorrer desses 2 anos e 6 meses.

Aos meus pais, Eliete Cavalcante Araújo de Oliveira e Carlos Augusto Araújo de Oliveira, por serem a base de tudo e pelo apoio, suporte e amor dedicado.

Ao meu amor, Bruno Henrique, pelo companheirismo, paciência e apoio dedicados sempre que precisei.

Ao professor Gibson Rocha Meira por toda a atenção prestada, pelas orientações e sugestões que tanto enriqueceram este trabalho.

Aos técnicos do LABEME (Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas) da Universidade Federal da Paraíba, Sérgio, Cláudio e Ricardo, os quais foram essenciais para a realização dos vários ensaios.

Ao apoio oferecido pelo grupo de pesquisa do GMAT (Laboratório de Pesquisa em Materiais e Resíduos da Construção) do Instituto Federal da Paraíba. A Pablo Ramon, colega integrante do GMAT, pela ajuda importantíssima na etapa de análise de resultados.

Ao LABEME pela disponibilidade de equipamentos e instalações para realização dos ensaios, como também pela disponibilização de veículo que auxiliou as coletas de materiais para a pesquisa.

Ao GMAT pela disponibilidade dos equipamentos para realização dos ensaios não destrutivos.

À Taíssa Guedes, Mohara Medeiros e Luane Guedes, amigas que nasceram durante o mestrado e que estiveram presentes para apoiar, ouvir e incentivar nos momentos bons e ruins.

RESUMO

Os ensaios não destrutivos são uma ferramenta importante na avaliação das propriedades do concreto, tanto durante a execução de estruturas quanto depois de acabadas. Nesse tipo de avaliação, podem ser empregadas curvas de correlações que possibilitam a determinação indireta dessas propriedades. No entanto, essas correlações devem ser específicas para os materiais e condições de aplicação em análise. Este estudo buscou obter curvas de correlação entre propriedades de concretos empregados na região da grande João Pessoa-PB e ensaios não destrutivos. Para tal, medidas de esclerometria e de resistividade elétrica superficial associadas a medidas de resistência à compressão e à tração foram empregadas em concretos de três classes de resistência e em cinco idades distintas. Os resultados desta pesquisa forneceram curvas de correlação com ajustes significativos entre as variáveis analisadas, as quais caracterizam com confiabilidade as propriedades dos diferentes concretos utilizados. As curvas obtidas podem ser utilizadas para avaliar os concretos usinados produzidos na região da grande João Pessoa-PB, com composição semelhante (cimento CP V ARI) e com valores de resistência à compressão dentro do intervalo de 30 MPa a 50 MPa aos 28 dias.

PALAVRAS-CHAVES: Concreto; ensaios não destrutivos; curvas de correlação.

ABSTRACT

The non-destructive tests are an important tool in the evaluation of concrete properties both during and after finishing the execution of structures. In this type of evaluation, correlation curves can be used to the indirect determination of these properties. However, these correlations should be specific to the materials and application conditions under analysis. This study sought to obtain correlation curves between properties of concrete used in the region of João Pessoa-PB and non-destructive tests. For this purpose, sclerometry and surface electrical resistivity measures associated with compressive and tensile strength results were used in concretes of three resistance classes and at five different ages. The results of this research provide correlation curves with significant adjustments between the analyzed variables, which reliably characterize the properties of the different tested concretes. The curves can be used to evaluate the produced concretes in the region of João Pessoa-PB, with a similar composition (cement CP V ARI) and with compressive strength values within the range of 30 MPa to 50 MPa at 28 days.

KEY WORDS: Concrete; non-destructive testing; correlation curves.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	3
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	5
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1. ASPECTOS GERAIS SOBRE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	7
2.2. PROPRIEDADES DO CONCRETO E CURVAS DE CORRELAÇÃO.....	8
2.2.1. Resistência à compressão e à tração do concreto	8
2.2.2. Fatores que influenciam.....	10
2.2.3. Curvas de correlação	13
2.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	14
2.3.1. Método do esclerômetro de reflexão	14
2.3.1.1. Descrição	14
2.3.1.2. Aplicações	15
2.3.1.3. Vantagens e limitações.....	16
2.3.1.4. Fatores que influenciam o método	17
2.3.1.5. Curvas de correlação utilizando o esclerômetro	20
2.3.2. Método de resistividade elétrica superficial	23
2.3.2.1. Descrição	23
2.3.2.2. Aplicações	26
2.3.2.3. Vantagens e limitações.....	28
2.3.2.4. Fatores que influenciam o método	28
2.3.2.5. Curvas de correlação utilizando a resistividade elétrica superficial	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. 1ª ETAPA: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	35
3.1.1. Agregados miúdo e graúdo	35
3.1.2. Cimento	36
3.2. 2ª ETAPA: CONCRETAGEM, MOLDAGEM E ENSAIOS	37
3.2.1. Ensaios não destrutivos	38
3.2.1.1. Esclerometria	38
3.2.1.2. Resistividade elétrica superficial.....	41
3.2.2. Ensaios das propriedades mecânicas do concreto	42

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	45
4.1.1. Agregados miúdos	45
4.1.2. Agregados graúdos	47
4.1.3. Cimentos	49
4.1.4. Concretos	51
4.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO.....	53
4.2.1. Resistência à compressão	54
4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral	56
4.3. ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	58
4.3.1. Esclerometria	58
4.3.2. Resistividade elétrica superficial	60
4.4. CURVAS DE CORRELAÇÃO	62
4.4.1. Resistência à compressão x Esclerometria (f_c x $IE\alpha$)	64
4.4.2. Resistência à compressão x Resistividade elétrica superficial (f_c x RES)	79
4.4.3. Resistência à tração por compressão diametral x Esclerometria ($f_{ct,sp}$ x $IE\alpha$)	94
4.4.4. Resistência à tração por compressão diametral x Resistividade elétrica superficial ($f_{ct,sp}$ x RES).....	107
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	120
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
APÊNDICES	131

LISTAS DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
---------	-------------

A	área do eletrodo principal
a	distância entre os eletrodos
a/c	relação água/cimento
f _c	resistência à compressão
f _{ck}	resistência característica à compressão
f _{cm}	resistência média à compressão aos 28 dias
f _{cm} (t)	resistência média à compressão com idade de t dias
f _{ct,sp}	resistência à tração por compressão diametral
f _{ctm}	resistência média à tração aos 28 dias
f _{ctm} (t)	resistência média à tração com idade de t dias
h	altura do corpo de prova
I	corrente elétrica que atravessa o corpo de prova
IE	índice esclerométrico médio
I _{Ei}	índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço
I _{Enom}	índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço
IE _α	índice esclerométrico médio efetivo
k	coeficiente de correção do índice esclerométrico
K1 e K2	constantes empíricas
n	número de impactos na bigorna de aço
R	resistência elétrica
r ²	coeficiente de determinação
Re	resíduos
Rer	resíduos relativos
RES	resistividade elétrica superficial multiplicada pelo coeficiente de correção de geometria
s	coeficiente relacionado ao tipo de cimento
V	tensão aplicada no corpo de prova
Y _{ajustado}	valor da resistência à compressão ou à tração calculado por meio do modelo ajustado

Y_{medido}	valor da resistência à compressão ou à tração obtido experimentalmente
ρ	resistividade elétrica superficial
ρ_v	resistividade elétrica volumétrica do concreto

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto.....	10
Figura 2 – Resistência em função da relação água/cimento do concreto	11
Figura 3 - Influência das condições de cura sobre a resistência.....	12
Figura 4 - Forma geral da relação altura/diâmetro sobre a resistência aparente de cilindros	13
Figura 5 – Operação do esclerômetro de reflexão.....	15
Figura 6 - Relação entre a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e o índice esclerométrico para leituras com esclerômetro horizontal e vertical em superfícies de concreto secas e úmidas.....	18
Figura 7 – Relação entre resistência a compressão de cilindros de concretos feitos com diferentes agregados	19
Figura 8 – Efeito do cascalho de diferentes fontes nos índices esclerométricos.....	19
Figura 9 - Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica ..	24
Figura 10 - Método dos 4 eletrodos para medida de resistividade elétrica superficial: A – amperímetro; V- voltímetro de alta impedância de entrada; a - distância entre os eletrodos	25
Figura 11 - Influência da distância das bordas nas leituras de resistividade do concreto seco ao ar	26
Figura 12 - Representação esquemática das etapas da pesquisa	34
Figura 13 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos no canteiro de obra	37
Figura 14 – Calibração do esclerômetro.....	39
Figura 15 – Ensaio de índice esclerométrico em corpo de prova cilíndrico.....	40
Figura 16 – Representação do Método de Wenner.....	41
Figura 17 – Ensaio de resistividade elétrica superficial pelo Método de Wenner em corpo de prova cilíndrico	42
Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão.....	43
Figura 19 – Ensaio de resistência à tração.....	44
Figura 20 – Sequência de ensaios realizados em um mesmo corpo de prova de concreto	44
Figura 21 – Curva granulométrica para os agregados miúdos	46
Figura 22 – Curvas granulométricas das britas da Central de concreto A	48

Figura 23 – Curvas granulométricas das britas da Central de concreto B.....	48
Figura 24 – Curvas granulométricas dos cimentos.....	50
Figura 25 – Evolução da resistência à compressão média (f_{cm}) com a idade (Central de concreto A)	55
Figura 26 – Evolução da resistência à compressão média (f_{cm}) com a idade (Central de concreto B)	55
Figura 27 – Evolução da resistência à tração média (f_{ctm}) com a idade (Central de concreto A).....	57
Figura 28 – Evolução da resistência à tração média (f_{ctm}) com a idade (Central de concreto A).....	57
Figura 29 - Evolução do índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$) com a idade (Central de concreto A)	59
Figura 30 - Evolução do índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$) com a idade (Central de concreto B).....	59
Figura 31 - Evolução da resistividade elétrica superficial (RES) com a idade (Central de concreto A)	61
Figura 32 - Evolução da resistividade elétrica superficial (RES) com a idade (Central de concreto B)	61
Figura 33 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para cada classe do concreto	65
Figura 34 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30....	66
Figura 35 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40....	66
Figura 36 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50....	67
Figura 37 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para a classe C30.....	68
Figura 38 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30....	68
Figura 39 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C30)	69
Figura 40 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para a classe C40.....	69
Figura 41 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40....	70
Figura 42 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C40)	70
Figura 43 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para a classe C50.....	71
Figura 44 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50....	71
Figura 45 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C50)	72

Figura 46 - Curva de correlação geral entre f_c e $IE\alpha$	73
Figura 47 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ (Geral).....	73
Figura 48 - Curva de correlação geral entre f_c e $IE\alpha$	74
Figura 49 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ (Geral).....	75
Figura 50 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Geral)	75
Figura 51 - Curva de correlação geral entre f_c e $IE\alpha$	77
Figura 52 - Comparação entre as curvas (f_c versus $IE\alpha$).....	77
Figura 53 - Comparação entre as curvas (f_c versus $IE\alpha$).....	78
Figura 54 - Curva de correlação entre f_c e RES para cada classe do concreto	80
Figura 55 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C30 ..	80
Figura 56 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C40 ..	81
Figura 57 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C50 ..	81
Figura 58 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C30	82
Figura 59 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C30 ..	83
Figura 60 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C30).....	83
Figura 61 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C40	84
Figura 62 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C40 ..	84
Figura 63 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C40).....	85
Figura 64 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C50	85
Figura 65 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C50 ..	86
Figura 66 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C50).....	86
Figura 67 - Curva de correlação geral entre f_c e RES	87
Figura 68 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES (Geral)	88
Figura 69 - Curva de correlação geral entre f_c e RE	89
Figura 70 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES (Geral)	89
Figura 71 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Geral)	90
Figura 72 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C30	92
Figura 73 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C40	92
Figura 74 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C50	92

Figura 75 - Curva de correlação entre f_c e RES (Geral)	93
Figura 76 - Comparação entre as curvas (f_c versus RES)	93
Figura 77 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para cada classe do concreto	95
Figura 78 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30	95
Figura 79 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40	96
Figura 80 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50	96
Figura 81 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C30	97
Figura 82 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30	98
Figura 83 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C30)	98
Figura 84 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C40	99
Figura 85 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40	99
Figura 86 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C40)	100
Figura 87 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C50	100
Figura 88 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50	101
Figura 89 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C50)	101
Figura 90 - Curva de correlação geral entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$	103
Figura 91 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ (Geral)	103
Figura 92 - Curva de correlação geral entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$	104
Figura 93 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ (Geral).	104
Figura 94 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Geral)	105
Figura 95 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C30	106
Figura 96 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ (Geral)	107
Figura 97 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e RES para cada classe do concreto	108

Figura 98 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C30	108
Figura 99 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C40	109
Figura 100 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C50	109
Figura 101 - Curva de correlação entre fct,sp e RES para a classe C30	110
Figura 102 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C30	111
Figura 103 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C30)	111
Figura 104 - Curva de correlação entre fct,sp e RES para a classe C40	112
Figura 105 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C40	112
Figura 106 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C40)	113
Figura 107 - Curva de correlação entre fct,sp e RES para a classe C50	113
Figura 108 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C50	114
Figura 109 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C50)	114
Figura 110 - Curva de correlação geral entre fct,sp e RES	116
Figura 111 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES (Geral).....	116
Figura 112 - Curva de correlação geral entre fct,sp e RE.....	117
Figura 113 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RE (Geral).....	117
Figura 114 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Geral)	118
Figura 115 - Curva de correlação entre fct,sp e RES para a classe C30	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão	27
Tabela 2 - Valores de resistividade elétrica característica a serem cumpridos por concretos em função da espessura do cobrimento	27
Tabela 3 - Composição granulométrica para os três tipos de agregados miúdos	45
Tabela 4 – Massa específica, massa unitária e material pulverulento das areias	46
Tabela 5 - Composição granulométrica para os quatros tipos de agregados graúdos	47
Tabela 6 – Massa específica, massa unitária e material pulverulento das britas.....	49
Tabela 7 – Massa específica e superfície específica (Blaine) dos cimentos	49
Tabela 8 – Análise química dos cimentos	50
Tabela 9 – Traços dos concretos (Central de concreto A).....	51
Tabela 10 – Traços dos concretos (Central de concreto B).....	52
Tabela 11 – Propriedade do concreto fresco	52
Tabela 12 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação ($f_c \times I E \alpha$).....	76
Tabela 13 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação ($f_c \times RES$)	90
Tabela 14 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação ($f_{ct,sp} \times I E \alpha$)	105
Tabela 15 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação ($f_c \times RES$) ...	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE)	21
Quadro 2 – Novas equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE)	21
Quadro 3 – Coeficientes de correção para diferentes dimensões de corpos de prova cilíndricos em função do espaçamento dos eletrodos.....	30
Quadro 4 - Equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e a resistividade elétrica superficial (RE)	32
Quadro 5 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo.....	36
Quadro 6 – Caracterização dos cimentos	36
Quadro 7 – Critério de Chauvenet.....	53
Quadro 8 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão (f_c) e índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$)	65
Quadro 9 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão (f_c) e resistividade elétrica superficial (RES)	79
Quadro 10 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à tração ($f_{ct,sp}$) e índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$).....	94
Quadro 11 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à tração ($f_{ct,sp}$) e resistividade elétrica superficial (RES).....	107

1. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo, o concreto foi considerado imutável e, somente na segunda metade do século XX, foi verificado que o material tinha uma vida útil limitada (SILVA, 2013). Tal constatação levou o meio científico e tecnológico a considerar aspectos de durabilidade nos projetos de estruturas de concreto armado.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) traz a seguinte definição: "A durabilidade consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas". Entretanto, além da variável agressividade ambiental, existe o controle tecnológico do concreto que muitas vezes é negligenciado. Segundo Rodrigues (2003), o concreto está sofrendo com o descaso no controle de qualidade na sua aplicação e com a falta de manutenção, além de sofrer com o meio ambiente cada vez mais agressivo.

No Brasil, há um grande número de estruturas de concreto armado nas regiões litorâneas que, por estarem expostas ao ambiente marinho, sofrem um processo de degradação muito agressivo, que é a corrosão das armaduras desencadeada pela ação dos cloretos. Dados numéricos revelam que 26,6% da população brasileira moram em municípios da zona costeira, correspondendo a um contingente aproximado de 50,7 milhões de habitantes (IBGE, 2010).

Inserida nessa região, está a cidade de João Pessoa-PB, onde as estruturas de concreto armado sofrem com as ações agressivas do ambiente marinho e urbano. Trabalhos como o de Silva (2003) e de Gomes *et al.* (2017) avaliaram as principais manifestações patológicas nas edificações localizadas em João Pessoa-PB. Ambos destacam que elas estão ocorrendo cada vez mais cedo e que as principais são a corrosão das armaduras, as infiltrações e as fissuras, causadas por um concreto permeável, má impermeabilização e rigidez inadequada de elementos estruturais, respectivamente. Ou seja, as manifestações patológicas estão associadas tanto ao ambiente agressivo quanto a falta de controle tecnológico do concreto. Pela diferença de 14 anos entre um estudo e outro, percebe-se que a prevenção contra a incidência desses problemas continua precária, demonstrando uma falta de compromisso do setor da construção civil com a durabilidade das edificações.

Portanto, há uma grande necessidade de inspeções periódicas nas estruturas de concreto armado, para avaliar o estado e realizar a manutenção preventiva, a fim de garantir a vida útil dos elementos estruturais. Diante disso, os ensaios não destrutivos (END) demonstram ser uma importante ferramenta para a engenharia civil, pois promovem uma análise mais abrangente da estrutura, podendo ser empregados tanto durante a execução das estruturas quanto depois de acabadas (IRRIGARAY, 2012).

Segundo Verma *et al.* (2013), os END foram usados por mais de três décadas para avaliar as condições de estruturas de concreto armado e, no século presente, tornaram-se mais sofisticados e são considerados como ferramentas poderosas e importantes para avaliar as estruturas de concreto existentes em relação à sua resistência e durabilidade. De acordo com o autor, os métodos não destrutivos têm chamado cada vez mais atenção no setor de construção civil, no sentido da confiabilidade e eficácia.

Diante disso, diferentemente de inspeções que fazem uso de ensaios destrutivos, como extração de testemunhos, a qual pode provocar algum dano a estrutura ou ser inviável diante do estado de degradação da mesma, os END oferecem vantagens significativas no que diz respeito à velocidade de execução, custo, ausência de danos à estrutura e imediata disponibilidade de resultados, como também permitem a realização de uma maior quantidade de ensaios, possibilitando, assim, uma investigação mais abrangente da estrutura em estudo (MACHADO, 2005).

De acordo com Evangelista (2002), os END podem ser empregados no monitoramento da evolução da resistência e para dirimir dúvidas sobre os processos executivos ou a qualidade dos materiais empregados durante a construção. Isto é, há métodos não destrutivos disponíveis que podem avaliar algumas propriedades do concreto, possibilitando uma estimativa de sua resistência, módulo de elasticidade e durabilidade (ANDRIOLO e SGARBOZA, 1993).

Para essa determinação, é necessário estabelecer curva de correlação entre o ensaio não destrutivo e a respectiva propriedade analisada. Geralmente, os fabricantes dos equipamentos fornecem estas curvas, porém são desenvolvidas usando materiais disponíveis no país deste fabricante (EVANGELISTA, 2002).

Para Malhotra (1984), o procedimento mais adequado é determinar curva de calibração própria para o concreto sob investigação e, a cada mudança no fornecimento

de materiais, determinar nova curva, para assim obter curvas de correlações que realmente expressem a propriedade do material na respectiva localidade.

As propriedades do concreto mais estudadas e associadas à ensaios não destrutivos são as mecânicas. A resistência à compressão é a mais conhecida dos engenheiros calculistas e construtores, por se tratar da propriedade mais difundida experimentalmente para avaliar a qualidade do concreto, mas há outras propriedades importantes como a resistência à tração e o módulo de elasticidade que geralmente não são medidas na maioria das obras executadas no Brasil (QUADROS, 2014).

Diante disso, o trabalho propõe obter curvas de correlação entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos para concretos empregados na grande João Pessoa-PB.

1.1. Justificativa

O diagnóstico de problemas estruturais é o entendimento sobre suas causas e seus efeitos. Um amplo aparato de métodos para uma melhor compreensão do problema é benéfico para a avaliação de desempenho e recuperação de estruturas.

Para essa avaliação, pode-se empregar ensaios não destrutivos e curvas de correlação, os quais possibilitam a determinação indireta das propriedades do concreto. Porém, o uso deste tipo de ensaio possui uma grande variabilidade de resultados, devido à heterogeneidade do concreto, com composição variada e matérias-primas diferentes (FERREIRA, 2011).

De acordo com Malhotra (1984), havendo mudanças dos materiais envolvidos na produção do concreto, uma nova curva de correlação deverá ser estabelecida, a fim de fornecer maior confiabilidade à estimativa da propriedade analisada.

Diante disso, percebe-se a necessidade de obtenção de curvas de correlação entre as propriedades do concreto e ensaios não destrutivos para cada região do país, caracterizando com confiabilidade as propriedades dos diferentes tipos e composições utilizadas.

Com essa finalidade, Machado (2005) avaliou a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos utilizados no Rio de Janeiro, obtendo como melhor resultado a correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico. Câmara (2006) avaliou a resistência à compressão de concretos utilizados na região da grande Florianópolis, verificando que os métodos combinados de ultrassom e esclerometria e o método de ultrassom isolado foram os que obtiveram melhores resultados. Palácios (2012) avaliou a resistência à compressão de concretos produzidos com materiais da região de Brasília, verificando que o ensaio de ultrassom é muito sensível, sendo afetado por alterações na composição do concreto mais que os demais métodos (esclerometria e penetração de pinos). Evangelista (2002) produziu 30 tipos de concretos em laboratório e analisou a influência de vários fatores, como o tipo e dimensão máxima de agregado, o tipo de cimento e o tipo de cura, nas grandezas medidas nos ensaios não destrutivos, na resistência à compressão e nas curvas de correlação elaboradas pela mesma.

Para a região da grande João Pessoa-PB, que corresponde às cidades de João Pessoa, Cabedelo, Bayeux, Santa Rita e Conde, não há pesquisas que se propõem a essa finalidade. Diante disso, esse trabalho visa a obtenção de correlações entre as propriedades do concreto e ensaios não destrutivos para os materiais e proporções utilizados na grande João Pessoa-PB, auxiliando assim uma análise preliminar de possíveis problemas que venham ocorrer nas edificações de concreto armado existentes na região.

O presente trabalho concentra seus ensaios em concretos dosados em centrais, em consequência do seu largo uso nos dias atuais e por apresentarem um controle mais rigoroso para a obtenção do concreto fresco, contribuindo assim para uma maior confiabilidade dos resultados obtidos na pesquisa.

1.2.Objetivos

Objetivo geral:

O objetivo geral dessa pesquisa é a obtenção de correlações entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos, normatizados ou não, para concretos utilizados na grande João Pessoa-PB.

Objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar o concreto endurecido em relação à resistência à compressão e à resistência à tração, nas idades de 3, 7, 28, 90 e 120 dias;
- ✓ Avaliar o comportamento do ensaio de esclerometria no concreto endurecido, nas idades de 3, 7, 28, 90 e 120 dias;
- ✓ Avaliar o comportamento do ensaio de resistividade elétrica superficial no concreto endurecido, nas idades de 3, 7, 28, 90 e 120 dias;
- ✓ Obter correlações entre a resistência à compressão do concreto e os índices esclerométricos médios efetivos (f_c versus $IE\alpha$) e, as medidas de resistividade elétrica superficial (f_c x RES);
- ✓ Obter correlações entre a resistência à tração do concreto e os índices esclerométricos médios efetivos ($f_{ct,sp}$ versus $IE\alpha$) e, as medidas de resistividade elétrica superficial ($f_{ct,sp}$ x RES);
- ✓ Comparar os resultados das correlações obtidas com os existentes na literatura.

1.3. Limitações da pesquisa

Esta pesquisa possui as seguintes limitações:

- ✓ Foram utilizados concretos de três classes diferentes (C30, C40 e C50), desta forma, os valores de resistência à compressão e à tração estão dentro de uma faixa restrita de valores;
- ✓ Todos os concretos utilizados foram fabricados com o cimento do tipo CP V ARI;
- ✓ Não foi verificado o comportamento dos ensaios não destrutivos nos elementos estruturais onde os concretos foram utilizados.

1.4. Organização da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, sendo este o primeiro deles, que contempla a introdução, a justificativa, os objetivos e as limitações da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre as propriedades mecânicas do concreto estudadas, resistência à compressão e à tração, como também em relação aos dois ensaios não destrutivos realizados, esclerometria e resistividade elétrica superficial.

O terceiro capítulo apresenta a descrição dos materiais e métodos empregados para a realização dos ensaios utilizados na pesquisa.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões. Neste, são encontrados os dados e análises realizadas para os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, esclerometria, e resistividade elétrica superficial.

No quinto e último capítulo, são apontadas as principais conclusões e as sugestões para pesquisas futuras. Finalmente, são apresentados as referências bibliográficas e os apêndices.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Aspectos gerais sobre ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos demonstram ser uma importante ferramenta para a construção civil, por proporcionar uma análise mais abrangente da estrutura de concreto armado, podendo ser empregados tanto em edificações novas, antigas ou em construção.

Esses ensaios são realizados *in loco* e auxiliam na avaliação de estruturas com sinais de deterioração, verificando a sua integridade e capacidade de resistência às solicitações, como também podem proporcionar um maior controle tecnológico do concreto nas primeiras idades, para atividades de desforma, protensão e aumento de carga na estrutura, ao monitorar a evolução da resistência (BS 1881:PART 201, 1986; CÂMARA, 2006).

Eles são comumente utilizados nas estruturas de concreto para avaliação de diversas propriedades físicas e mecânicas, a depender do método a ser empregado.

Carino (1994) divide os ensaios não destrutivos em dois grupos:

- **Para avaliação da resistência do concreto:** esclerometria, ultrassom, ensaio de arrancamento, ensaio de fratura interna, ensaio de penetração de pinos, ensaio de aderência, ensaio de torque Stoll, método da maturidade e métodos combinados.
- **Para avaliação de estruturas:** inspeção visual, auscultação, ecoimpacto, termografia infravermelha, radar de sub-superfície, métodos nucleares, métodos magnéticos e elétricos, emissão acústica, fibras óticas e penetrabilidade.

As principais propriedades mecânicas analisadas nas estruturas de concreto são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Com relação aos ensaios não destrutivos, os mais empregados para a obtenção indireta das propriedades são a esclerometria e o ultrassom. Entretanto, outros métodos não destrutivos são propostos para esse fim, a exemplo do ensaio de resistividade elétrica superficial, o qual é empregado nesta pesquisa. Para avaliação dessas principais propriedades do concreto por meio de métodos não destrutivos são utilizadas curvas de correlação.

Segundo a norma BS 1881:PART 201 (1986), além dos usos já informados, os ensaios não destrutivos são úteis para os seguintes propósitos:

- Controlar a qualidade em pré-moldados ou construções *in loco*;
- Remover incertezas para aceitabilidade do material;
- Confirmar ou negar dúvidas quanto à fabricação envolvida em lotes, misturas, adensamento ou cura do concreto;
- Localizar e determinar a extensão das fissuras, vazios e falhas na concretagem;
- Determinar a posição, diâmetro ou condições das armaduras;
- Determinar a uniformidade do concreto;
- Aumentar o nível de confiança de um número menor de ensaios destrutivos;
- Confirmar ou localizar suspeita de deterioração do concreto resultante dos seguintes fatores: sobrecarga, fadiga, ataque ou mudança química externa ou interna, fogo, explosão, efeitos ambientais;
- Avaliar a durabilidade potencial do concreto;
- Monitorar mudanças de longo prazo em propriedades de concreto;
- Fornecer informações para uma possível mudança de função de uma estrutura.

2.2. Propriedades do concreto e curvas de correlação

2.2.1. Resistência à compressão e à tração do concreto

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros de controle de qualidade, pois está intimamente ligada à segurança estrutural. Nos projetos estruturais de concreto armado, há indicação da resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), que é o valor da resistência à compressão que tem 95% de probabilidade de ser alcançado, em ensaios de corpos de prova de um determinado lote de concreto aos 28 dias.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), na prática, a maior parte do concreto está sujeita, simultaneamente, à combinação de tensões de compressão, de cisalhamento e de tração. Entretanto, como a resistência à compressão é muito maior que os outros tipos de resistências, a maior parte dos elementos de concreto é projetada para tirar vantagem dessa condição.

Dessa forma, muitos profissionais da construção civil desprezam o baixo valor da resistência à tração e usam o aço para suportar as tensões de tração. Contudo, o conhecimento dessa resistência é importante para a determinação da tensão em que a fissuração inicia, pois a ausência de fissuração contribui para a manutenção da continuidade de uma estrutura de concreto e, em muitos casos, para a prevenção da corrosão das armaduras (NEVILLE, 2016).

O cálculo da resistência à tração é imprescindível ao se trabalhar com grandes obras de estruturas de concreto simples, como barragens, onde é impraticável o uso das armaduras de aço para suportar tensões de tração (METHA e MONTEIRO, 2008). De acordo com Neville (2016), além das barragens, há outras estruturas, como os pavimentos de rodovias e de aeroportos, que possuem a tração na flexão como solicitação predominante.

As resistências do concreto nas estruturas são estimadas por meio de ensaios com corpos de prova padronizados, regidos por normas técnicas específicas. Para a determinação da resistência à compressão, é realizado um ensaio de compressão axial regido pela NBR 5739 (ABNT, 2007).

Para a determinação da resistência à tração, há três tipos de ensaio: tração direta (raramente utilizada), tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222, 2011) e tração na flexão (ABNT NBR 12142, 2010). No entanto, esses diferentes métodos de ensaios fornecem diferentes valores de resistência à tração para um mesmo material. Para NEVILLE (2016), a tração por compressão diametral pode ser considerada em 5 a 12% maior que a tração direta, enquanto que Raphael (1984), observou que a resistência à tração na flexão é, em geral, 35% maior que a resistência à tração por compressão diametral.

No entanto, ao se comparar os resultados dos ensaios de resistência com o comportamento do material *in loco*, podem ocorrer algumas variações, devido a particularidades ocorridas no transporte, lançamento, adensamento, cura e exsudação, levando a peça a possuir, em geral, uma resistência menor do que a obtida em ensaios com corpos de prova (CÂMARA, 2006).

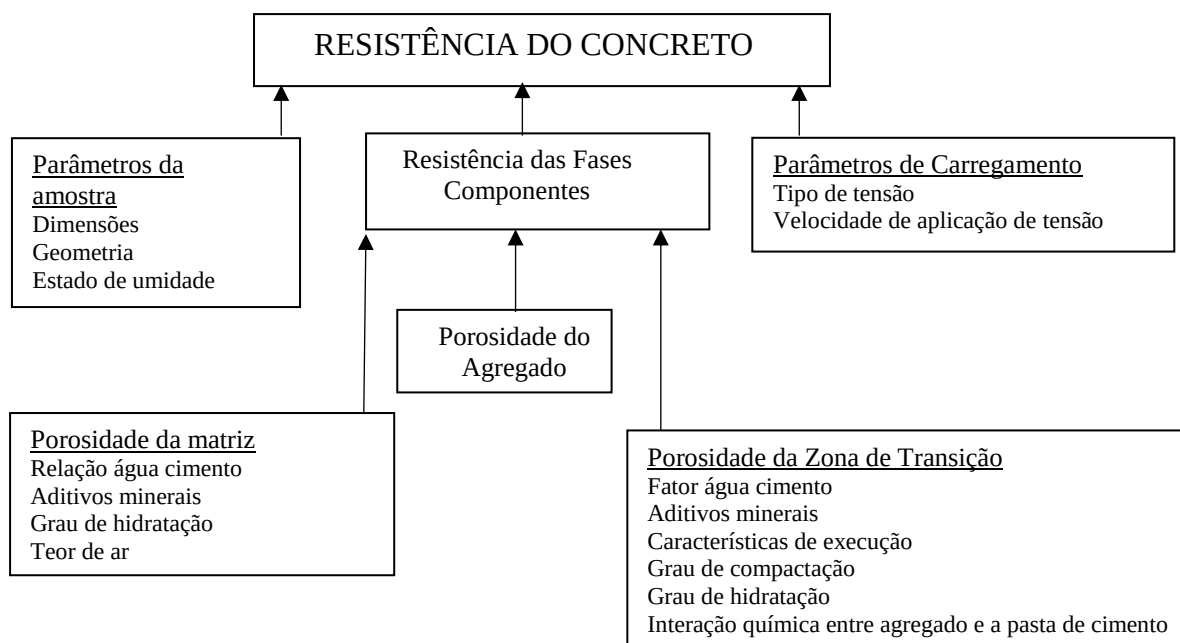
2.2.2. Fatores que influenciam

Segundo Helene (1993), a resistência é uma propriedade muito sensível, com capacidade de indicar as variações da qualidade de um concreto, já que qualquer modificação na uniformidade, natureza ou proporcionalidade dos materiais poderá alterar essa propriedade.

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que em materiais heterogêneos como o concreto, a porosidade de cada componente pode ser um fator limitante para a resistência. Como os agregados naturais são geralmente densos e resistentes, são as porosidades da matriz da pasta de cimento e da zona de transição na interface entre o agregado gráúdo e a pasta, que normalmente determinam a resistência do concreto. Segundo os mesmos autores, existe, em geral, uma relação inversa fundamental entre a porosidade e a resistência.

A Figura 1 demonstra a complexidade de interação entre os diversos fatores que influenciam a resistência do concreto.

Figura 1 - Interação dos fatores que influenciam a resistência do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 67).

De acordo com Metha e Monteiro (2008), como a resistência do concreto é influenciada por diversos fatores, então, para simplificar o entendimento, esses podem ser divididos em três categorias: características e proporções dos materiais, condições de cura e parâmetros de ensaio.

As características e proporções dos materiais estão relacionadas ao tipo de cimento, a resistência do agregado, aditivos e adições, impurezas na água de amassamento, quantidade de ar incorporado e a relação água/cimento. Neville (2016) informa que na prática, considera-se que a resistência do concreto em uma determinada idade e submetido à cura úmida a uma temperatura especificada, depende principalmente apenas da relação água/cimento e do grau de adensamento.

O valor da resistência de um concreto plenamente adensado é inversamente proporcional à relação água/cimento (NEVILLE, 2016; MEHTA e MONTEIRO, 2008). A relação foi estabelecida por Duff Abrams, em 1919, que determinou a Equação 1.

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (1)$$

onde:

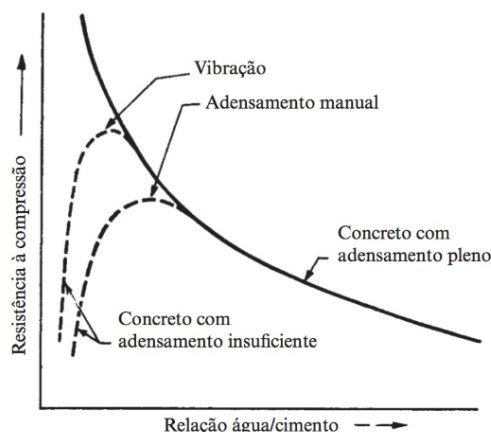
f_c = resistência do concreto (MPa);

K_1 e K_2 = constantes empíricas;

a/c = relação água/cimento.

A partir desta equação é feita uma curva típica de resistência em função da relação água/cimento que é mostrada na Figura 2 (NEVILLE, 2016).

Figura 2 – Resistência em função da relação água/cimento do concreto

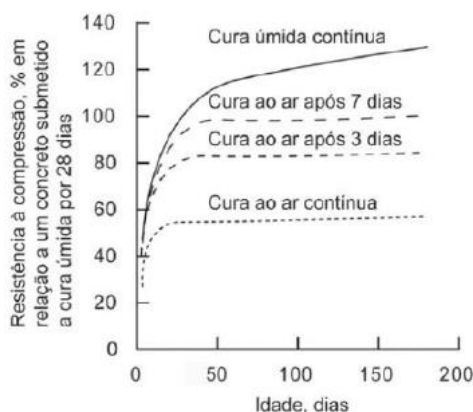


Fonte: Neville (2016, p. 286).

Mehta e Monteiro (2008) informam que a relação água/cimento-porosidade é o fator mais influente na resistência do concreto, pois quanto maior a relação água/cimento e menor for o grau de hidratação do cimento, maior será a porosidade capilar do material e menor será a resistência. Assim, a porosidade capilar da pasta depende da relação a/c da mistura e do grau de hidratação, que controlam a resistência do concreto (NEVILLE, 2016).

A cura do concreto envolve uma combinação de condições que promovem a hidratação do cimento, como o umidade, tempo e temperatura (efeito acelerador de reações da hidratação), após o lançamento do concreto nas fôrmas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). O seu objetivo é manter o concreto saturado, sob condições normais de temperatura, por tempo necessário para que os espaços inicialmente ocupados pela água na pasta fresca de cimento, sejam ocupados, até o ponto desejado pelos produtos da hidratação do cimento (NEVILLE, 2016). Além disso, o processo de cura úmida deve ser realizado também para evitar a perda precoce da água nas idades iniciais da mistura, o que pode gerar microfissuras, levando, como consequência, a uma queda na sua resistência. A Figura 3 demonstra a relação entre a resistência e as condições de cura.

Figura 3 - Influência das condições de cura sobre a resistência



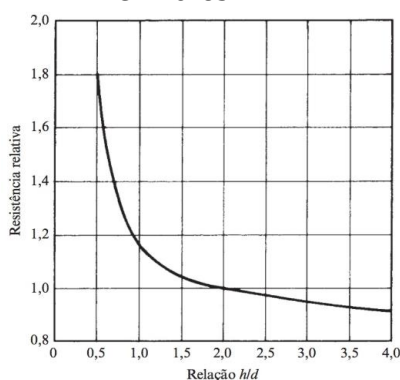
Fonte: Concrete Manual, 8th Ed., US. Bureau of Reclamation (1981 *apud* Mehta e Monteiro, 2008, p. 62).

Os parâmetros de ensaio estão relacionados às condições de carregamento e à razão altura/diâmetro do corpo de prova. Quanto as condições de carregamento do ensaio, a velocidade de aplicação possui uma grande influência sobre a resistência. Por isso, devem ser seguidas as condições estabelecidas pela NBR 5739 (ABNT, 2007), em que, para o ensaio de resistência à compressão, a velocidade de carregamento deve ser mantida

constante e em torno de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, a velocidade de carregamento deve ser mantida constante e em torno de $0,05 \pm 0,02$ MPa/s.

A resistência é influenciada também pela relação altura/diâmetro do corpo de prova. A NBR 5739 (ABNT, 2007) estabelece que o ensaio de resistência à compressão seja realizado em corpos de prova que atendam relação altura/diâmetro nunca maior do que 2,02 e em caso de esta relação ser menor de que 1,94, efetuar a devidas correções dispostas na citada norma. A Figura 4 demonstra influência da relação altura/diâmetro sobre a resistência aparente de cilindros.

Figura 4 - Forma geral da relação altura/diâmetro sobre a resistência aparente de cilindros



Fonte: NEVILLE (2016, p. 618).

As normas brasileiras recomendam a utilização de corpos de prova cilíndricos, porém, em alguns países, diversas pesquisas são realizadas com corpos de prova cúbicos, em geral, com 150 mm de aresta. A norma europeia BS EN 206-1 (2000 *apud* NEVILLE, 2016) reconhece o uso dos dois tipos de corpos de prova e, apresenta uma tabela de equivalência de resistências à compressão até 50 MPa. Para essa norma, todos os valores da resistência do cilindro equivalem a 0,8 do valor de resistência do cubo.

2.2.3. Curvas de correlação

Para que os métodos de ensaio não destrutivos (END), realizados *in loco*, sejam utilizados para avaliar indiretamente as propriedades do concreto, são necessárias curvas de correlação entre essas propriedades mecânicas analisadas e os END.

De acordo com Câmara (2006), para o emprego do ensaio não destrutivo *in loco*, é aconselhável estabelecer as correlações através de um estudo experimental em laboratório, usando os mesmos materiais utilizados na obra a ser ensaiada.

Segundo Evangelista (2002), alguns ensaios não destrutivos podem ser primeiramente realizados no corpo de prova e, em seguida, realizar o ensaio para determinar o valor da propriedade mecânica (ensaio destrutivo). No entanto, na maioria dos casos, os ensaios são realizados em separado, tendo-se corpos de prova distintos para os ensaios que estimam a propriedade mecânica e para os ensaios não destrutivos. Nesse caso, é extremamente importante que ambos os grupos de corpos de prova tenham as mesmas condições de compactação e maturidade.

Vale salientar que, segundo Malhotra (1984), os ensaios não destrutivos não devem ser encarados como substitutos dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade padronizados, mas somente como uma técnica adicional.

2.3. Ensaios não destrutivos

2.3.1. Método do esclerômetro de reflexão

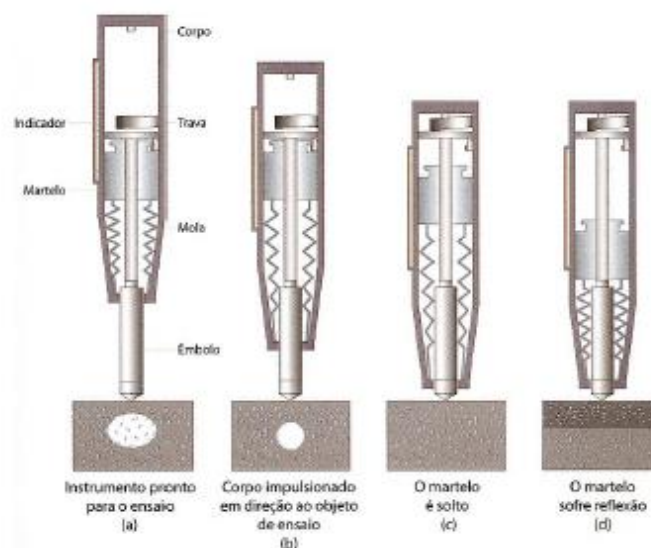
2.3.1.1. Descrição

O método do esclerômetro de reflexão é um procedimento padronizado para avaliação da dureza superficial e consiste em impactar uma superfície de concreto com uma determinada energia de impacto e, medir o rebote ou a reflexão de uma massa padrão após o impacto no concreto. O valor do rebote é o índice esclerométrico (IE).

Segundo a BS 1881:Part 201 (1986), esse ensaio de dureza da superficial baseia-se no princípio de que a recuperação de uma massa elástica depende da dureza da superfície que atinge.

O ensaio é realizado por meio do esclerômetro de reflexão de Schmidt, constituído por um martelo controlado por mola que transmite uma carga a um êmbolo. O equipamento está representado na Figura 5.

Figura 5 – Operação do esclerômetro de reflexão



Fonte: Mehta e Monteiro (2008, p. 389).

Segundo Malhotra e Carino (2004), o martelo pesa cerca de 1,8 kg e é adequado para uso em laboratório e no campo. O teste pode ser conduzido horizontalmente, verticalmente para cima ou para baixo, ou em qualquer ângulo intermediário. Contudo, devido aos diferentes efeitos da gravidade no rebote, conforme o ângulo de teste é alterado, o valor do rebote será diferente para o mesmo concreto. Diante disso, são necessárias curvas de correlação individuais para cada ângulo.

2.3.1.2. Aplicações

O ensaio de esclerometria é utilizado principalmente para estimar a resistência do concreto por meio de curvas de calibração. Entretanto, não existe uma correlação única entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico, devido a influência de diversos fatores nessa correlação, como o tipo e quantidade de cimento, natureza do agregado, maturidade da matriz e teor de umidade do concreto (FOCAOARU, 1984).

De acordo com Breysse e Martínez-Fernández (2014), ao longo dos últimos 50 anos, um grande número de programas experimentais têm tentado correlacionar as medidas do esclerômetro com a resistência à compressão. Devido a isso, um número impressionante de modelos foi gerado, pois a cada novo estudo é gerado uma nova correlação. Dessa maneira, percebe-se que uma correlação universal é imprópria para esse

aparelho. Contudo, na prática diária, medidas de esclerometria são utilizadas para prever a resistência à compressão, sem muitas vezes o profissional conhecer as limitações do ensaio.

Segundo NEVILLE (2016), o ensaio com esclerômetro é usado também para verificação da resistência à abrasão de pisos de concreto, que dependem bastante da dureza superficial.

Malhotra e Carino (2004) afirmam que em ensaios de laboratório, com um esclerômetro calibrado adequadamente, o erro na estimativa da resistência do concreto é de $\pm 15\%$ a 20% , enquanto que em uma estrutura de concreto é de $\pm 25\%$.

2.3.1.3. Vantagens e limitações

O aparelho possui as vantagens de ser leve, simples de operar e barato, sendo que uma grande quantidade de dados pode ser obtida rapidamente. Os danos que podem ser causados na superfície são praticamente nulos (EVANGELISTA, 2002).

Conforme a BS 1881:Part 201 (1986), esse equipamento apresenta várias limitações. Os resultados referem-se apenas a uma zona de superfície de até 30 mm de profundidade e pode ser muito afetada pelo endurecimento localizado, devido à carbonação quando o concreto tem mais de 3 meses de idade, e, nesse caso, o concreto no interior da peça não pode mais ser representado pela camada superficial.

Além disso, esses resultados são influenciados por outros fatores, incluindo a textura da superfície, as condições de umidade da superfície, tipo de cimento, tipo de agregado gráúdo e rigidez dos corpos de prova ensaiados e, da idade e cura dos mesmos (MALHOTRA e CARINO, 2004).

Em seu estudo, Evangelista (2002) demonstrou que o índice esclerométrico é influenciado significativamente pelo tipo de agregado gráúdo britado, agregado leve e tipo de cimento.

O ensaio também apresenta sensibilidade às variações locais do concreto – por exemplo, a presença de uma grande partícula de agregado logo abaixo da haste pode

resultar em um índice muito elevado, enquanto a presença de um vazio na mesma situação resulta em um valor muito baixo (NEVILLE, 2016).

2.3.1.4.Fatores que influenciam o método

Influência da carbonatação:

Os efeitos da carbonatação são mais severos em concretos mais antigos, quando a camada carbonatada possuir alguns milímetros de espessura e, em casos extremos alcançar 20 mm de espessura. Nesses casos, os valores de índice esclerométrico podem chegar a ser 50% superiores àqueles obtidos em uma superfície de concreto não carbonatado (MALHOTRA e CARINO, 2004).

Isso ocorre devido ao processo de carbonatação provocar o aumento da dureza superficial do concreto, em função da precipitação de carbonato de cálcio (CaCO_3) nos poros do material (FERREIRA, 2011).

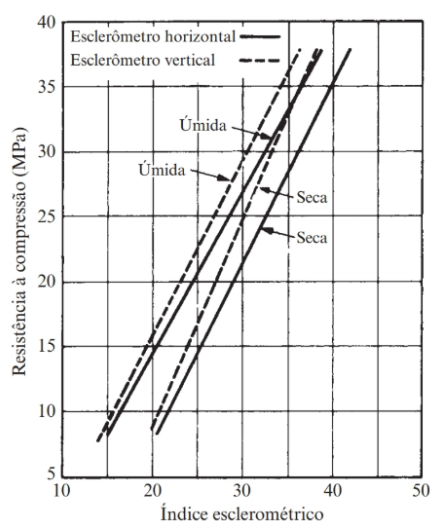
Influência da textura da superfície:

Segundo Malhotra e Carino (2004), em uma textura áspera, a ponta do êmbolo provoca esmagamento excessivo e um valor reduzido de índice esclerométrico é medido. Recomenda-se, portanto, a retificação da superfície rugosa até a uma textura uniformemente lisa por meio de um disco de carborundum (carbeto de silício), a fim de obter resultados mais precisos (NEVILLE, 2016).

Influência das condições de umidade da superfície:

Mehta e Monteiro (2008) destacam que uma superfície úmida no concreto resulta em índice esclerométrico menor do que uma superfície seca. Esse fato é verificado na Figura 6, a qual compara a relação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico em superfícies de concreto secas e úmidas.

Figura 6 - Relação entre a resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos e o índice esclerométrico para leituras com esclerômetro horizontal e vertical em superfícies de concreto secas e úmidas



Fonte: Neville (2016, p. 655).

Outros autores, apresentam resultados similares, como Repette (1991), o qual enfatiza que os índices esclerométricos indicativos de valores de resistência para o concreto úmido podem alcançar valores até 20% menores que aqueles com o concreto seco e, em alguns tipos de concreto, as discrepâncias podem ainda ser maiores.

Ferreira (2011), em sua pesquisa, concluiu que ocorreu um comportamento semelhante tanto para os blocos quanto para as vigas, com uma redução no índice esclerométrico à medida que a umidade superficial aumentou. O decréscimo no valor do índice esclerométrico para os blocos foi de 11% até a absorção de 1750g/m² de água na superfície e o decréscimo para as vigas foi de 4,5% até a absorção de 1000 g/m² de água na superfície.

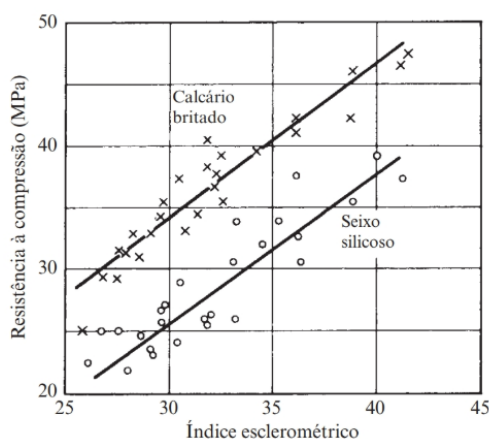
Influência do tipo de cimento:

Na sua pesquisa, Evangelista (2002) utilizou concretos com cimento CP III-32 e CP V ARI e, verificou que há uma diferença significativa entre os índices esclerométricos obtidos. Os valores mais altos são para a série de concreto que utilizam o cimento CP V ARI, pois esse tipo de cimento hidrata-se mais rapidamente que os demais, levando à variações de 13% a 70% em relação aos valores dos índices esclerométricos obtidos para os concretos com CP III-32.

Influência do tipo do agregado graúdo:

NEVILLE (2016) afirma que o índice esclerométrico é influenciado pelo tipo de agregado utilizado. Essa informação pode se verificada na Figura 7, em que para uma mesma resistência obtêm-se índices esclerométricos diferentes para concretos com agregados diferentes.

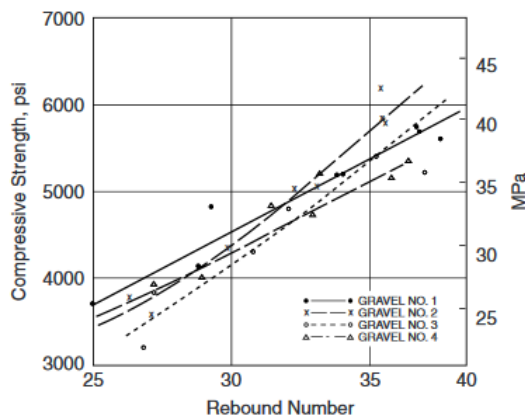
Figura 7 – Relação entre resistência a compressão de cilindros de concretos feitos com diferentes agregados



Fonte: Neville (2016, p. 654).

Segundo Malhotra e Carino (2004), mesmo que o tipo de agregado graúdo usado seja o mesmo, mas obtidos de diferentes fontes, diferentes curvas de correlação são necessárias. A Figura 8 apresenta o resultado de uma pesquisa em que quatro diferentes cascalhos foram usados, sendo verificada uma dispersão da resistência à compressão.

Figura 8 – Efeito do cascalho de diferentes fontes nos índices esclerométricos



Fonte: Malhotra e Carino (2004, p. 1-10).

Influência da rigidez dos corpos de prova ensaiados:

De acordo com Machado (2005), o impacto do esclerômetro não deve provocar deslocamento e, tão pouco, vibração no elemento a ser ensaiado, pois isto influencia os resultados obtidos. Sendo assim, elementos estruturais ou corpos de prova devem ser convenientemente apoiados ou fixados, antes da realização dos ensaios.

Influência da idade e cura dos corpos de prova ensaiados:

Malhotra e Carino (2004) ressaltam que o uso do esclerômetro de Schmidt para testar concreto de baixa resistência em idades iniciais, ou onde concreto possuir resistência inferior a 7 MPa, não é recomendável, porque os índices esclerométricos são muito baixos, além disso o ensaio prejudica gravemente a superfície do concreto.

Evangelista (2002) identificou a influência das condições de cura nos resultados dos índices esclerométricos. Em sua pesquisa, corpos de provas de mesmo concreto foram curados por tempos diferentes, por 48 horas e por 7 dias imersos em água. Os corpos de prova curados durante 7 dias apresentaram índices maiores que os corpos de prova curados por 48 horas imersos em água, chegando a diferenças na ordem de 10%.

A NBR 7584 (ABNT, 2013) prescreve que a influência da idade na dureza superficial em relação à obtida nas condições normalizadas aos 28 dias é advinda do processo de cura e carbonatação. Desta forma, as correlações não são automaticamente válidas para idades superiores a 60 dias ou inferiores a 14 dias.

2.3.1.5. Curvas de correlação utilizando o esclerômetro

Diversos pesquisadores estudaram a existência de correlação entre resistência à compressão e índices esclerométricos. Dessa forma, Evangelista (2002) organizou em seu trabalho algumas curvas de correlações (Quadro 1).

Quadro 1 - Equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE)

Autor	Equação	f_c (MPa)	Corpo de prova	Tipo de agregado	OBS
Ravindraiah e Tam (1988)	$f_c = 7,25(e^{0,08IE})$	15,0 a 75,0	Cubo 100mm	granito ($D_{máx}=20mm$)	
Almeida (1993)	$f_c = 1,0407IE^{1,1546}$	40,1 a 120,3	Cubo 150mm	granito ($D_{máx}=25mm$)	1ª e 2ª etapas de ensaio
	$f_c = 1,041IE^{1,155}$				
Gonçalves (1995)	$f_c = 1,73IE - 34,3$	18,0 a 42,0	Testemunho 70mmx70mm		Idade – 28 dias a 3 meses
Qasrawi (2000)	$f_c = 1,353IE - 17,393$	6,0 a 42,0	Cubo 150mm	diversos	
Soshiroda e Voraputhaporn (1999)	$f_c 28 = 1,61IE^3 - 1,37$	20,0 a 65,0	Cubo 150mm	Seixo	IE ₃ – em 3 dias
	$f_c 28 = 1,47IE^{28} - 16,85$				IE ₂₈ – aos 28 dias
Lima e Silva (2000)	$f_c = 0,0501IE^{1,8428}$	25,1 a 33,1	Cilindro	Brita 0 e 1	

Fonte: Evangelista (2002).

Após o trabalho de Evangelista (2002), outras curvas foram propostas, tanto em trabalhos internacionais como no Brasil e, estão organizadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Novas equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE)

Autor	Equação	R ²	f_c (MPa)	Corpo de prova	Tipo de agregado	Tipo de cimento	Idade dos ensaios
Evangelista (2002)	$f_c = 0,033IE^{2,02}$	0,82	10,8 a 53	Cilindro (150 mm x 300 mm)	Gnaiss - $D_{máx}=19mm$	CP II 32	3, 7, 14, 28 e 90 dias
	$f_c = 0,007IE^{2,477}$	0,90	10,1 a 46		Gnaiss - $D_{máx}=9,5mm$		
	$f_c = 0,046EI^{1,888}$	0,78	23,3 a 58,3		Gnaiss $D_{máx}=19mm$	CP V ARI	

Fonte: autoria própria.

Quadro 2 – Novas equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE) (Continuação)

Autor	Equação	R ²	f_c (MPa)	Corpo de prova	Tipo de agregado	Tipo de cimento	Idade dos ensaios
Machado (2005)	$f_c = 0,026IE^{2,044}$	0,90	12,9 a 61,2	Cilindro (150 mm x 300 mm)	Gnaiss e Sienito. D _{máx} = 19mm	CP III	3, 7, 14, 28 e 90 dias
Câmara (2006)	$f_c = 1,8538IE - 25,126$	0,73	5 a 45	Cilindro (10 cm x 20 cm)	Brita 0 e 1, ambos de origem granítica	CPIV-RS	Cura ao ar/ 1, 3, 7, 14, 28 e 90 dias
	$f_c = 2,233IE - 25,386$	0,89					Cura úmida/ 1, 3, 7, 14, 28 e 90 dias
Palacios (2012)	$f_c = 3,13IE - 64,842$	0,81	28,8 a 52,4	Cilindro (10 cm x 20 cm)	Rocha calcária - D _{máx} = 19 mm e 9,5 mm	CP V ARI	7 e 28 dias
Mohamad <i>et al.</i> (2015)	$f_c = 0,0104IE^{2,1986}$	0,68	8 a 50	Cilindro (150 mm x 300 mm) e Cubos de 150 mm	Brita 0, 1 e 2	CP IV – 32 e CP V – ARI	Ensaio nas idades de 7, 14 e 28 dias
Rashid e Waqas (2017)	$f_c = -0,08IE^2 + 8,37IE - 157,54$	0,65	20 a 50	Cubos de 150 mm	D _{máx} = 20 mm	Cimento Portland comum	7, 28 e 56 dias

Fonte: autoria própria.

Ao analisar os Quadros 1 e 2, percebe-se que as várias curvas propostas foram obtidas a partir de diferentes materiais (cimento e agregados variados), de diferentes tamanhos e formatos de corpos de prova, como também foram geradas por meio de ensaios realizados em dias variados. Isto é, as pesquisas dentro dessa temática, não seguem um padrão pré-estabelecido. Contudo, infere-se que, apesar das disparidades existentes, as curvas de correlação mais adequadas, para correlacionar a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico (IE), são obtidas por meio das funções do tipo potência e linear.

2.3.2. Método de resistividade elétrica superficial

2.3.2.1. Descrição

A resistividade elétrica superficial do concreto é a propriedade do material que reflete a habilidade para transportar uma carga elétrica e está intimamente relacionada com a microestrutura do concreto. Segundo Medeiros-Junior (2016), vários estudos consideram a resistividade como um fator importante que tem relação com a permeabilidade do concreto a agentes agressivos, como cloreto e dióxido de carbono.

Barrow (1964 *apud* ABREU, 1998) define resistividade elétrica como a propriedade que caracteriza a dificuldade com que os íons se movimentam em solução aquosa no concreto, sujeitos a um campo elétrico. De acordo com RILEM TC 154-EMC (2000), um baixo valor de resistividade elétrica está geralmente correlacionado com uma rápida penetração de cloretos e uma alta taxa de corrosão, ou seja, quanto maior a resistividade do concreto maior sua resistência a agentes agressivos. Hunkeler (1996) afirma que a resistividade depende da microestrutura da pasta (volume de poros e distribuição do tamanho dos mesmos), da umidade, concentração dos sais e da temperatura.

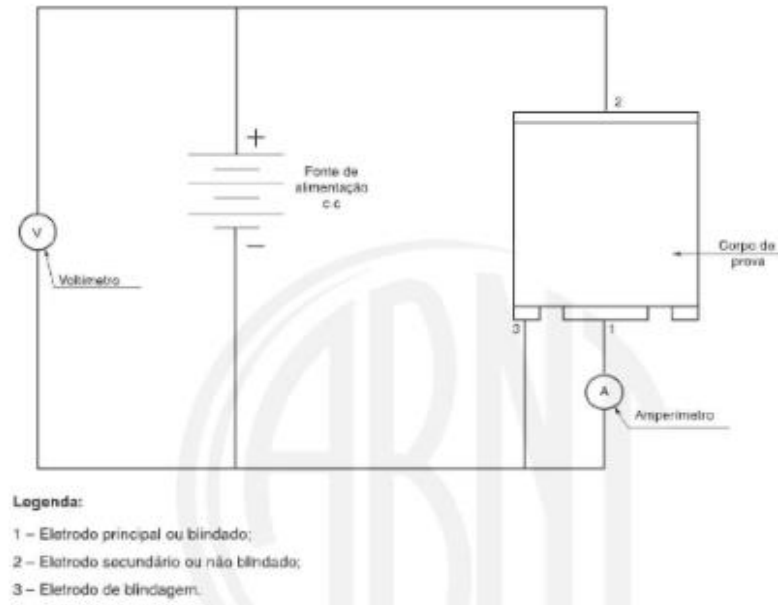
A medição dessa propriedade é realizada por meio da leitura da corrente elétrica gerada por uma diferença de potencial aplicada entre eletrodos colocados sobre a superfície ou embutidos no concreto (SANTOS, 2006).

Segundo Abreu (1998), existem vários métodos de medida de resistividade, porém a maioria deles foi desenvolvida para atender finalidades específicas, adequadas a pesquisas em laboratório. Dependendo da região do elemento de concreto no qual se mede a resistividade, obtém-se informações diferentes: aparente, no caso da resistividade elétrica superficial do concreto, ou volumétrica, quando se referir a parte mais interna do concreto (ABREU, 1998).

O método descrito pela NBR 9204 (ABNT, 2012) permite a medida de resistividade elétrica volumétrica em laboratório, em corpos de prova cilíndricos moldados ou extraídos de estruturas. Utilizando-se uma fonte de corrente contínua, aplica-se uma tensão de $50 \pm 0,5$ V entre dois eletrodos de mercúrio nas faces do corpo

de prova e, um terceiro eletrodo, também de mercúrio, é utilizado para evitar erros devido aos efeitos de superfície (ABREU, 1998). A Figura 9 ilustra o esquema elétrico do ensaio.

Figura 9 - Esquema elétrico para determinação da resistividade elétrica volumétrica



Fonte: NBR 9204 (ABNT, 2012, p. 11).

A resistividade elétrica volumétrica pode ser calculada utilizando-se a Equação 2:

$$\rho_v = \frac{V \cdot A}{I \cdot h} \quad (2)$$

onde:

ρ_v = resistividade elétrica volumétrica do concreto ($\Omega \cdot \text{cm}$);

V = tensão aplicada no corpo de prova (mV);

A = área do eletrodo principal (cm^2);

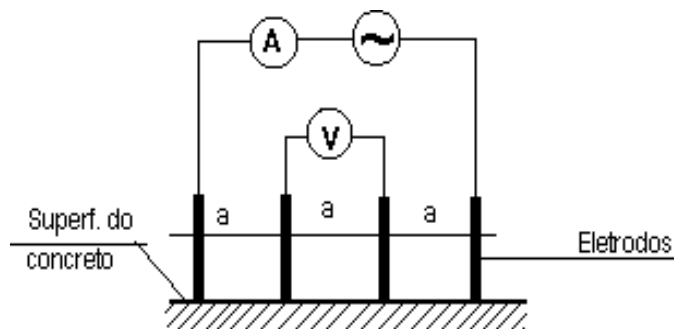
I = corrente elétrica que atravessa o corpo de prova (mA);

h = altura do corpo de prova (cm).

Segundo Santos (2006), esse método possui dificuldade de realização, devido à complexidade na montagem da célula de ensaio com a utilização de mercúrio como eletrodo, que segundo o autor, parece ser um fator condicionante da utilização deste método.

A técnica para medir a resistividade elétrica superficial foi desenvolvida originalmente por geólogos para medir a resistividade do solo em etapas de investigação. Existe uma norma brasileira para este fim, a NBR 7117 (ABNT, 2012), a qual auxilia na determinação da estratificação do solo. Esse método foi adaptado para a utilização em concreto utilizando-se um aparato semelhante ao utilizado para medidas de resistividade de solo realizadas *in loco*, o qual compõe-se de quatro eletrodos posicionados de forma alinhada na superfície do concreto, denominada de método dos quatro eletrodos ou método de Wenner (SANTOS, 2006). A Figura 10 ilustra o esquema elétrico para medida de resistividade elétrica superficial.

Figura 10 - Método dos 4 eletrodos para medida de resistividade elétrica superficial: A – amperímetro; V- voltímetro de alta impedância de entrada; a - distância entre os eletrodos



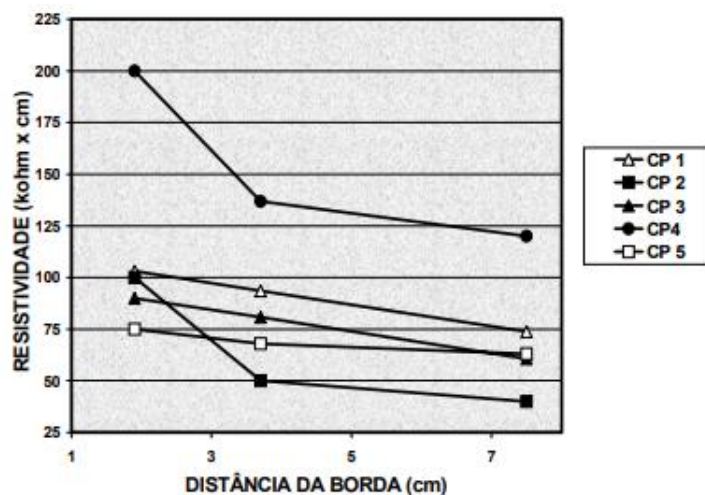
Fonte: Abreu (1998, p. 29).

Segundo Santos (2006), adicionalmente outras técnicas foram desenvolvidas e adaptadas tanto para a medida da resistividade elétrica superficial em estruturas reais como em amostras analisadas em laboratório, e se diferenciam em termos da quantidade de eletrodos utilizados e do posicionamento destes na superfície do concreto. Contudo, o método de Wenner é ainda o mais utilizado.

De acordo com IAEA (2002), um espaçamento de 50 mm é comumente adotado, por proporcionar um pequeno grau de dispersão. Contudo, a utilização de outros espaçamentos é permitida para evitar erros significativos, caso a resistividade seja medida próximo às extremidades da peça de concreto. Medeiros (2001) analisou o efeito das medidas de resistividade próxima às bordas dos elementos de concreto e, verificou que ao realizar medidas da resistividade do centro para as bordas, o contorno de baixa condutividade tem o efeito de aumentar a resistividade aparente do material próximo às

bordas, fazendo com que a mesma se distancie da real. Os resultados do autor são mostrados na Figura 11.

Figura 11 - Influência da distância das bordas nas leituras de resistividade do concreto seco ao ar



Fonte: Medeiros (2001, p. 62).

Medeiros (2001) recomenda que as leituras próximas das bordas de peças de concreto devem ser evitadas para não conduzir a distorções nos resultados, levando a medidas superestimadas pela influência de regiões mais resistentes.

2.3.2.2. Aplicações

Segundo Andrade e D'Andrea (2011), a medida de resistividade elétrica pode avaliar os seguintes aspectos do concreto: o endurecimento no estado fresco; grau de cura; resistência à penetração de cloretos e carbonatação; a taxa de corrosão das armaduras. Por conseguinte, permite uma avaliação da qualidade do concreto em todos os seus aspectos, pois é capaz de informar, ao fabricante e ao usuário do material, sua porosidade e seu teor de umidade. Com isso, se tem um controle completo das suas etapas de produção (ANDRADE e D'ANDREA, 2011).

Castellote *et al.* (2002) afirmam que esse ensaio permite acompanhar o desempenho do concreto tanto no período de iniciação quanto no de propagação da corrosão. Esta possibilidade é baseada na relação inversa entre resistividade elétrica e movimentação de íons. Isto é, quanto maior a resistividade, menor movimento das cargas elétricas.

Cascudo (1997) e Azarsa e Rishi (2017) relatam em seus trabalhos, a existência de vários critérios que visam relacionar a resistividade elétrica do concreto com a sua qualidade e o risco de corrosão. Estes são propostos por pesquisadores e pelos próprios fabricantes dos equipamentos, como pode ser visto na Tabela 1. A diferença entre os valores de resistividade elétrica superficial é devida às várias configurações experimentais, qualidade do concreto, composição e concentração inicial de cloretos estabelecidas nos ensaios (AZARSA e RISHI, 2017).

Tabela 1 - Critérios de avaliação do concreto armado quanto a resistividade com relação ao risco de corrosão

Risco de corrosão	Resistividade elétrica superficial (k Ω .cm)		
	Polder (2001) e Cigna <i>et al.</i> (2003)	Song e Saraswathy (2007)/ Elkey e Sellevold (1995)/ Comitê Euro-International du Beton (CEB 192:1988)	Fabricantes do equipamento de Wenner (Proceq e Giatec Scientific Inc.)
Alto	< 10	< 5	≤ 10
Moderado	10 a 50	5 a 10	10 a 50
Baixo	50 a 100	10 a 20	50 a 100
Insignificante	> 100	> 20	≥ 100

Fonte: Cascudo (1997) e Azarsa e Rishi (2017).

Andrade *et al.* (2009) também relacionam a resistividade elétrica do concreto com o risco de corrosão das armaduras. Em seu trabalho, os autores informam os valores mínimos de resistividade elétrica superficial que devem ser cumpridos em relação à espessura do cobrimento do concreto, para que assim, o material não apresente risco de corrosão por carbonatação e/ou por penetração de cloretos (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de resistividade elétrica superficial a serem cumpridos por concretos em função da espessura do cobrimento

Cobrimento (mm)	Resistividade elétrica superficial (Ω .m)	
	Carbonatação	Penetração de cloretos
20	250	2500
30	120	1110
40	63	625
80	15	160

Fonte: Andrade *et al.* (2009).

Dessa maneira, a resistividade elétrica é um método conveniente para o propósito de analisar o desempenho de estruturas de concreto armado quanto a sua durabilidade

(SENGUL, 2014), sendo assunto de interesse em diversas pesquisas voltadas a essa temática.

Outra aplicação é citada por Medeiros-Junior (2016), o qual informa que medidas de resistividade elétrica podem prever a resistência à compressão de pasta de cimento Portland. Em seus estudos, Lübeck *et al.* (2012) observaram que as medidas de resistividade nas suas amostras crescem à medida que a resistência mecânica aumenta. Isso significa que com o aumento da densidade da matriz do cimento, devido ao progresso da hidratação, ambas, resistência mecânica e resistividade elétrica, tendem a crescer para todas as amostras de cimento verificadas (MEDEIROS-JUNIOR *et al.*, 2014).

2.3.2.3. Vantagens e limitações

A medição de resistividade elétrica superficial é um método não destrutivo *in situ* rápido, simples e barato para obter informações relacionadas ao risco de corrosão no concreto armado (IAEA, 2002).

Contudo, a resistividade elétrica do concreto é conhecida por ser influenciada por diversos fatores. Diante disso, as medidas de resistividade elétrica superficial precisam ser realizadas em condições controladas de umidade, temperatura, geometria e proporções da mistura.

2.3.2.4. Fatores que influenciam o método

Influência da umidade:

A variação do teor de umidade é uma das variáveis mais importantes, pois a corrente elétrica que atravessa o concreto é conduzida pela solução aquosa dos poros. O volume dessa solução diminui com a redução do teor de umidade e, a passagem de corrente elétrica é reduzida com o consequente aumento da resistividade elétrica (HUNKELER, 1996).

Chen *et al.* (2014) pesquisaram sobre a influência do teor de água na resistividade elétrica e, verificaram que as medidas dos corpos de prova secos, no forno ou no ar com

40% de umidade relativa, eram instáveis ou até mesmo não detectadas. Por outro lado, essas medições nas amostras na condição SSS (saturado superfície seca) ou úmida tinham resistividades semelhantes. Portanto, sugere-se que as amostras devam ser molhadas antes das medições de resistividade.

Larsen *et al.* (2006 *apud* AZARSA e RISHI, 2017) descobriram que quando o teor de umidade diminui 88% para 77%, a resistividade elétrica aumenta em média duas vezes e, quando diminui de 88% para 66%, a resistividade aumenta em média de seis vezes. Diante disso, Azarsa e Rishi (2017) afirmam que, para fins de controle de qualidade, é essencial assegurar o mesmo grau de umidade nos diferentes concretos, convergindo com a sugestão de Chen *et al.* (2014).

Influência da temperatura:

Lübeck *et al.* (2012) e RILEM TC 154-EMC (2000) afirmam que as mudanças de temperatura têm efeitos importantes sobre a resistividade do concreto. Uma temperatura mais alta causa a diminuição do valor da resistividade e, vice-versa (para uma umidade constante). Isso é causado por mudanças na mobilidade iônica na solução dos poros e por mudanças no ion-sólido.

Essa influência é particularmente crítica quando as medidas são tomadas durante a diferentes estações, com leituras marcadamente mais altas durante o período de inverno do que o período de verão (IAEA, 2002).

Diante disso, para eliminar o efeito da temperatura nas medidas de resistividade elétrica superficial, a maioria dos estudos são realizados com as amostras curadas no tanque de água saturada de cal com temperatura controlada, entre 20°C e 25°C (AZARSA e RISHI, 2017).

Influência da geometria:

Segundo Azarsa e Rishi (2017), no método dos quatro pontos, as medições de resistividade elétrica são realizadas considerando o meio semi-infinito. Essa consideração leva a uma dispersão nos valores medidos para um concreto de tamanho relativamente pequeno (por exemplo: corpos de prova cilíndricos ou prismáticos), pois diverge da condição ideal de ter uma geometria infinitamente grande.

Porém, apesar de vários pesquisadores perceberem o efeito da geometria das amostras, apenas informações limitadas estão disponíveis sobre este tema. Para compensar esse efeito, uma correção é sugerida. A medida de resistividade elétrica superficial deve ser multiplicada pelo coeficiente de correção de geometria. A UNE 83988-2:2014 orienta alguns coeficientes em função do espaçamento dos eletrodos para corpos de prova cilíndricos (Quadro 3).

Quadro 3 – Coeficientes de correção para diferentes dimensões de corpos de prova cilíndricos em função do espaçamento dos eletrodos

Dimensão do corpo de prova cilíndricos, em mm	a = 3,5 cm	a = 5,0 cm
150 x 300	0,714	0,606
100 x 200	0,384	0,377
75 x 150	0,384	-
a: Espaçamento entre os eletrodos		

Fonte: UNE 83988-2:2014.

Influência da relação água/cimento:

Medeiros-Junior *et al.* (2014) observaram que para um mesmo tipo de cimento e mesma idade de ensaio, é possível observar que a medida de resistividade decresce à medida que a relação a/c aumenta. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato da solução de poro na estrutura interna do concreto funcionar como um condutor. Sendo assim, quanto maior a quantidade de água nas amostras, combinado com a maior permeabilidade do meio, ambos provenientes da maior relação água/cimento, tem-se uma maior condutividade no interior do concreto, resultando em menores valores de resistividade.

Influência do tipo de cimento:

Medeiros-Junior *et al.* (2014) observaram a influência de quatro tipos de cimento brasileiros (CP II-F, CP III, CP IV e CP V ARI) na resistência à compressão e na resistividade elétrica superficial de amostras de concreto. Foram analisadas três relações água/cimento, o que resultou em doze distintas dosagens. Este estudo mostrou que os tipos de cimento têm um efeito significativo na resistividade. Os concretos fabricados com cimento Portland de alto forno (CP III) apresentaram uma maior resistividade,

comportamento este relacionado com o efeito de refinamento dos poros e redução da permeabilidade, devido a quantidade considerável de adições, entre 60-70%.

Lübeck *et al.* (2012), em sua pesquisa, concluíram também que o uso de escória no concreto altera a microestrutura da pasta, pois a adição refina a estrutura dos poros e, por sua vez, afeta a resistividade elétrica. Aumenta essa propriedade à medida que o teor de escória aumenta, resultando em concretos mais duráveis.

Influência do agregado graúdo:

Azarsa e Rishi (2017) informam que, em geral, dependendo da localização e do tamanho, os agregados têm uma maior resistividade elétrica em comparação a pasta de cimento endurecido. Devido a menor porosidade da pasta, que promove a facilidade de passagem de corrente elétrica por meio do sistema de poros.

Sengul (2014), em seu estudo experimental, indicou que o aumento na quantidade de agregado graúdo resultou em maior resistividade elétrica. Também observou que a resistividade elétrica da mistura contendo 60% agregado, com o tamanho de 16–32mm, era aproximadamente 3 vezes maior do que a pasta de cimento endurecida. Sengul (2014) afirma que o aumento na quantidade de agregado e a redução na pasta de cimento, para um determinado volume de concreto, resultaram em valores mais elevados de resistividade, por causa da substituição da pasta de cimento por agregados graúdos.

Hou *et al.* (2017) também investigaram os efeitos dos agregados graúdos sobre a resistividade elétrica do concreto, produzindo misturas com vários tipos, tamanhos e quantidades de agregados graúdos, condicionados por 28 dias e testados sob uma condição saturado superfície seca. Hou *et al.* (2017) observaram que a resistividade é sensível ao aumento do teor de agregado graúdo (aumento de até 30%), pois em vez de alterar a hidratação do cimento, serviu como obstáculo elétrico que resultou no aumento da resistividade. Isto é, uma maior quantidade de material aumentou a existência de obstáculos, aumentando a resistividade.

Com relação a influência do tamanho do agregado graúdo, Sengul (2014) e Hou *et al.* (2017) também analisaram esse parâmetro em suas pesquisas. Contudo, Hou *et al.* (2017) observaram que as variações no tamanho e tipo de agregado não exercem efeitos significativos sobre a propriedade, enquanto que Sengul (2014), ao comparar o efeito de

dois tamanhos diferentes de agregados (0 a 4 mm e 16 a 32 mm), observou que o maior tamanho do agregado resultou em valores mais elevados de resistividade elétrica. Azarsa e Rishi (2017) afirmam que o essencial para diminuir o efeito do tamanho dos agregados é utilizar um espaçamento entre os eletrodos de 1,5 vezes maior do que o tamanho máximo do agregado.

2.3.2.5. Curvas de correlação utilizando a resistividade elétrica superficial

Pesquisas com o propósito de obter curvas de correlação entre a resistência à compressão e as medidas de resistividade elétrica superficial são mais recentes do que para outros ensaios não destrutivos, contudo, essas apresentam correlações bastante significativas como é mostrado no Quadro 4.

Quadro 4 - Equações propostas para correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e a resistividade elétrica superficial (RES)

Autor	Equação	R ²	Corpo de prova	Tipo de cimento	Idade dos ensaios	OBS
Andrade e D' Andrea (2011)	$f_c = 6,8973 \ln(RE) + 6,8267$		Cilindro (150 mm x 300 mm)			Método dos quatro pontos de Wenner/ R em $\Omega.m$.
Medeiros-Junior <i>et al.</i> (2014)	$f_c = 21,24 \ln(RE) + 11,20$	0,823	Cilindros (100 mm x 200 mm) e cubos de 250 mm de arestas	CP II-F 32	Aos 28 dias	Método dos quatro pontos de Wenner/ R em $k\Omega.cm$.
	$f_c = 49,05 \ln(RE) - 43,03$	0,995			Aos 91 dias	
	$f_c = 32,34 \ln(RE) - 68,97$	0,997		CP III RS 40	Aos 28 dias	
	$f_c = 65,36 \ln(RE) - 208,67$	0,995			Aos 91 dias	
	$f_c = 41,50 \ln(RE) - 61,38$	0,999		CP IV 32	Aos 28 dias	
	$f_c = 70,34 \ln(RE) - 175,80$	0,993			Aos 91 dias	
	$f_c = 14,66 \ln(RE) + 23,29$	0,992		CP V ARI	Aos 28 dias	
	$f_c = 32,28 \ln(RE) - 6,92$	0,999			Aos 91 dias	

Wei <i>et al.</i> (2012)	$f_{28d} = 8,76.RE_{24h} + 20,4$	0,963			Aos 28 dias ensaio de resistência à compressão/ Valores de resistividade às 24 horas.	Resistividade elétrica da pasta de cimento no estado fresco, medida por um aparelho sem contato/ R em $\Omega.m$.
-----------------------------	----------------------------------	-------	--	--	---	--

Fonte: autoria própria.

Ao analisar o Quadro 4, percebe-se a existência de poucos estudos que objetivam a obtenção de curvas de correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e a resistividade elétrica superficial (RES). Apesar disso, pode-se observar que as curvas mais adequadas são obtidas por meio da função do tipo logarítmica.

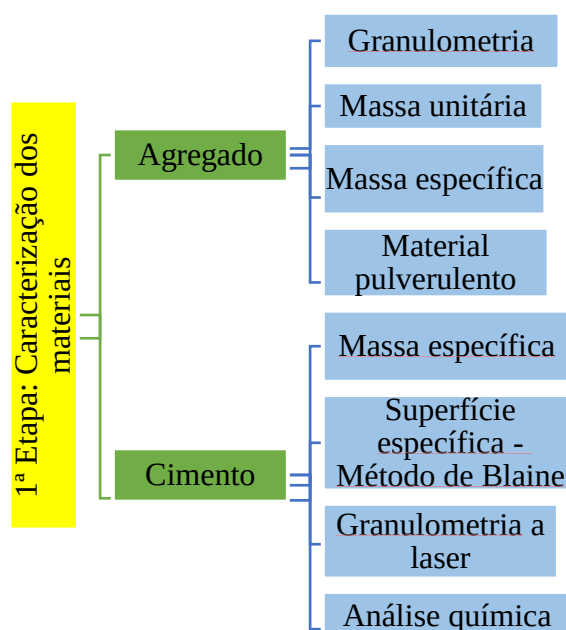
3. MATERIAIS E MÉTODOS

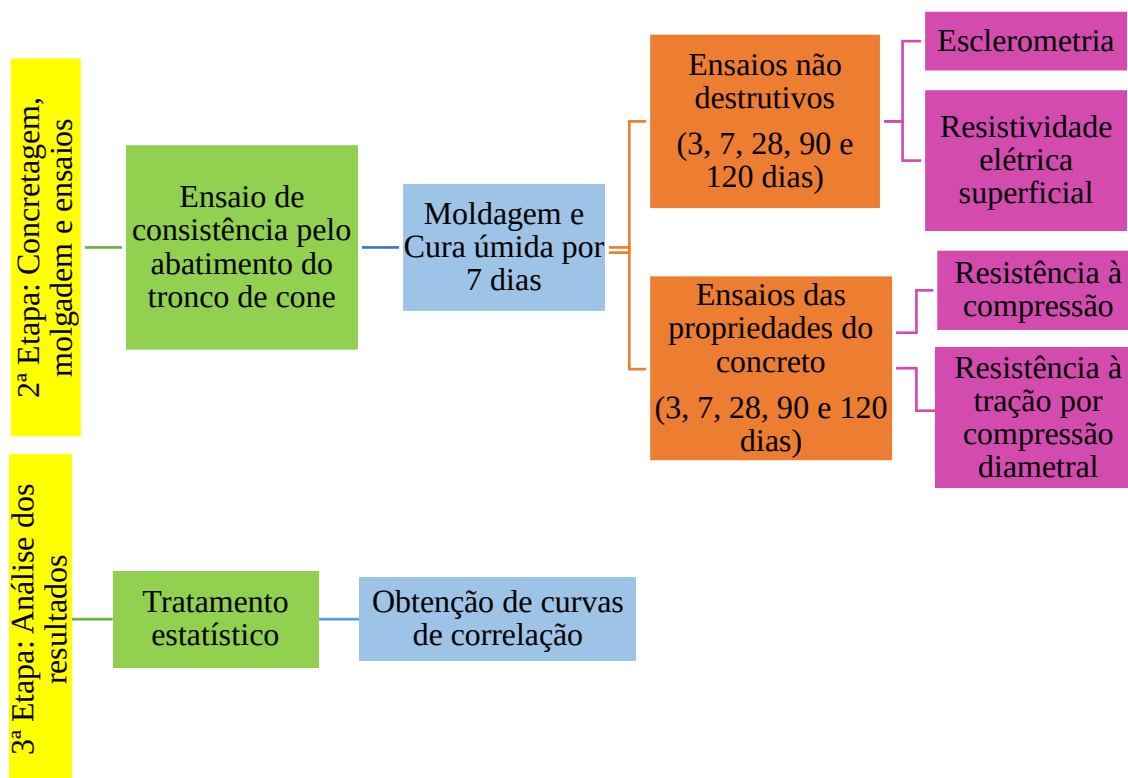
O programa experimental adotado utilizou concretos fornecidos por duas centrais de concreto da cidade de Cabedelo-PB e foi planejado dentro da infraestrutura disponível do Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas (LABEME) da Universidade Federal da Paraíba e do Laboratório de Pesquisa em Materiais e Resíduos da Construção (GMAT) do Instituto Federal da Paraíba.

A pesquisa foi dividida em três etapas (Figura 12). A primeira etapa consistiu na caracterização dos materiais (agregados miúdos, graúdos e cimentos) utilizados pelas centrais, denominadas de Central de concreto A e Central de concreto B. A segunda etapa compreendeu a moldagem dos corpos de prova em obras, a cura úmida por 7 dias, a realização dos ensaios não destrutivos (esclerometria e resistividade elétrica superficial) e a avaliação das propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão e resistências à tração por compressão diametral). Todos esses ensaios foram realizados em cinco idades do concreto (3, 7, 28, 90 e 120 dias).

A terceira etapa consistiu no tratamento estatístico dos resultados (ensaios destrutivos e não destrutivos) e obtenção das curvas de correlação por meio de regressão não linear.

Figura 12 - Representação esquemática das etapas da pesquisa





Fonte: autoria própria.

3.1. 1ª Etapa: Caracterização dos materiais

3.1.1. Agregados miúdo e graúdo

Os agregados miúdo e graúdo foram recolhidos nos pátios das centrais de concreto, ambas localizadas em Cabedelo-PB. Para o agregado miúdo, a Central de concreto A faz uso de dois tipos (Areia Tipo A1 e Areia Tipo A2) e a Central de concreto B faz uso de um único tipo (Areia Tipo B1). Em relação a agregado graúdo, as Centrais de concreto A e B utilizaram dois tipos (Brita Tipo A1 e Brita Tipo A2 para Central A e, Brita Tipo B1 e Brita Tipo B2 para a Central B).

As amostras foram recolhidas conforme a NBR NM 26 (ABNT, 2009) e reduzidas para ensaios em laboratório de acordo com a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

Seguindo orientação da NBR 7211 (ABNT, 2009), os agregados foram caracterizados pelos seguintes ensaios com as respectivas normas:

Quadro 5 – Caracterização dos agregados miúdo e graúdo

Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Determinação da massa unitária – Método C: estado solto	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem (Material pulverulento)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)
Determinação da massa específica - Agregado miúdo	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Determinação da massa específica - Agregado graúdo	NBR NM 53 (ABNT, 2009)

Fonte: autoria própria.

3.1.2. Cimento

Os cimentos foram recolhidos nos silos das usinas de concreto, ambas localizadas em Cabedelo-PB. As Centrais de concreto A e B utilizaram o mesmo tipo de cimento (CP V – ARI). Entretanto, são de fabricantes diferentes. Desse modo, as amostras foram recolhidas e caracterizadas pelos seguintes ensaios com as respectivas normas:

Quadro 6 – Caracterização dos cimentos

Determinação da massa específica	NBR NM 16605 (ABNT, 2017)
Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)	NBR NM 16372 (ABNT, 2015)

Fonte: autoria própria.

Os cimentos também foram ensaiados quanto a sua granulometria e composição química. A distribuição granulométrica dos cimentos foi determinada por granulometria a laser, através do equipamento fabricado pela CILAS (Compagnie Industrielle des Lasers) modelo 1090 LD (liquid & dry) pelo método seco. Em relação à composição química, a análise foi realizada por meio da utilização de um espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku, modelo ZSX Primus II, equipado com tubo de Rh e 7 cristais analisadores.

3.2 2ª Etapa: Concretagem, moldagem e ensaios

A pesquisa utilizou concretos de duas empresas de concreto usinado, por terem grande uso na região da grande João Pessoa-PB e também devido ao melhor controle tecnológico em comparação aos concretos fabricados nas próprias obras. Em cada empresa, o presente estudo participou de três concretagens, que se diferenciam pela classe de resistência dos concretos.

Os concretos recolhidos pertencem às classes C30, C40 e C50. Essas classes foram escolhidas, pois são as mais utilizadas na região, como também, apresentam um intervalo significativo para realizar uma avaliação de correlação mais abrangente.

No início de cada concretagem, foi realizado o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67, 1998).

Após essa etapa, foi feita a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, conforme orientações contidas na NBR 5738 (ABNT, 2016). Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e depois foram colocados em cura em água saturada com cal até a idade de 7 dias. Ao todo foram moldados 32 corpos de prova cilíndricos de dimensão 10 cm x 20 cm para cada concreto, como é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos no canteiro de obra



Fonte: autoria própria.

A amostra de concreto foi coletada de um só caminhão betoneira, durante a operação de descarga, após a retirada dos primeiros 15% e antes de completar a descarga de 85% do volume total, de acordo com a NBR NM 33 (ABNT, 1998).

3.2.1. Ensaios não destrutivos

Os ensaios não destrutivos escolhidos para a realização da pesquisa foram esclerometria e resistividade elétrica superficial. Esses métodos foram realizados nos mesmos corpos de prova cilíndricos ensaiados à resistência à compressão e à tração, antes de serem rompidos.

Também foram separados dois corpos de prova de cada concretagem para serem ensaiados somente pelos métodos não destrutivos e, assim, analisar a evolução das medidas com o aumento da idade do material.

3.2.1.1. Esclerometria

A esclerometria mede a dureza superficial do concreto, possui norma brasileira (ABNT NBR 7584, 2013) e seus 16 impactos foram realizados na superfície lateral dos corpos de prova cilíndricos por meio de um esclerômetro da marca Schmidt analógico tipo N, com energia de impacto 0,225mkg.

Esses 16 impactos geram 16 índices esclerométricos individuais, foi feita a média aritmética e foram eliminados os índices que se afastaram em 10% do índice médio, obtendo-se, então, uma nova média e o desvio padrão. Contudo, também fez-se necessário encontrar o índice esclerométrico médio efetivo, a partir Equação 3:

$$IE\alpha = k \times IE \quad (3)$$

onde:

$IE\alpha$ = índice esclerométrico médio efetivo;

k = coeficiente de correção do índice esclerométrico;

IE = índice esclerométrico médio.

Conforme a NBR 7584 (ABNT, 2013), antes de sua utilização ou após 300 impactos deve ser efetuada a calibração do esclerômetro para a obtenção do coeficiente de correção do índice esclerométrico (k), empregando-se para tal uma bigorna de aço, realizando 10 leituras. Essa aferição foi feita conforme a Figura 14.

Figura 14 – Calibração do esclerômetro



Fonte: autoria própria.

O equipamento é considerado apto para uso, quando nenhuma das leituras situa-se fora do intervalo estabelecido pelo fabricante (75). Após as 10 leituras, foi calculado o coeficiente de correção (k) por meio da Equação 4.

$$k = \frac{n \cdot I_{Enom}}{\sum_{i=1}^n I_{Ei}} \quad (4)$$

onde:

k = coeficiente de correção do índice esclerométrico;

n = número de impactos na bigorna de aço;

I_{Enom} = índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante ($I_{Enom} = 80$) ;

I_{Ei} = índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço.

Dessa maneira, para o esclerômetro de Schmidt utilizado na pesquisa o k foi igual a 1,06.

Para realização do ensaio no concreto, cada corpo de prova cilíndrico foi fixado na prensa hidráulica universal para evitar a movimentação do mesmo durante a execução da esclerometria. Além disso, as recomendações a seguir, da NBR 7584 (ABNT, 2013), foram seguidas para a execução do ensaio.

- **Superfícies de ensaio:** devem ser secas ao ar, lisas e, preferencialmente, planas; superfícies úmidas ou carbonatadas devem ser evitadas;
- **Área de impacto:** toda poeira ou pó superficial devem ser removidos; estar compreendida entre 8.000 mm² e 40.000 mm²; distar no mínimo 50 mm dos cantos e arestas; é recomendado uma área de ensaio por elemento estrutural;
- **Impactos:** em cada área de ensaio devem ser efetuados 16 impactos. A distância mínima entre os centros de dois pontos de impacto deve ser de 30 mm;
- **Esbeltez dos elementos de concreto:** deve-se evitar área de ensaio em elementos de concreto com dimensões menores que 100 mm na direção do impacto;
- **Posição:** o esclerômetro deve ser aplicado preferencialmente na posição horizontal e consequentemente em superfícies verticais.

A Figura 15 mostra a realização dos ensaios nos corpos de prova cilíndricos.

Figura 15 – Ensaio de índice esclerométrico em corpo de prova cilíndrico



Fonte: autoria própria.

3.2.1.2. Resistividade elétrica superficial

A resistividade elétrica superficial é um ensaio que não possui norma brasileira para utilização em concretos. Esta pesquisa foi realizada seguindo as recomendações do RILEM TC 154-EMC (2000) para o Método de Wenner ou Método dos 4 pontos, usando um equipamento composto por quatro eletrodos igualmente espaçados e alinhados, que são pressionados sobre a superfície de concreto.

Os dois eletrodos externos induzem uma corrente de medição, com uma frequência de aproximadamente 13 Hz, e os dois eletrodos internos medem a diferença potencial. Por meio desses parâmetros, é determinada a resistência elétrica e depois calcula-se a resistividade elétrica do concreto através da Equação 5:

$$\rho = 2 * \pi * R * a \quad (5)$$

onde:

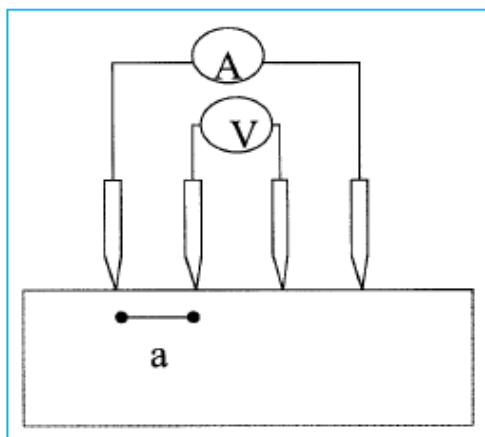
ρ = resistividade elétrica superficial em $\Omega.m$ ou $\Omega.cm$;

R = resistência elétrica em Ω ;

a = espaçamento entre os eletrodos em cm.

A representação do Método dos 4 pontos é mostrada na Figura 16:

Figura 16 – Representação do Método de Wenner



Fonte: RILEM TC 154-EMC (2000).

Todo corpo de prova cilíndrico foi ensaiado em estado saturado superfície seca, com o propósito de seguir a recomendação de Chen *et al.* (2014), de que as amostras de concreto devem ser molhadas antes das medições de resistividade.

Nas recomendações de RILEM TC 154-EMC (2000), é considerada uma boa prática utilizar espaçamentos entre os eletrodos de 3 a 5 cm. Nessa pesquisa, foi utilizado um espaçamento de 3 cm, para evitar os efeitos de borda e do tamanho dos agregados graúdos.

O valor do coeficiente utilizado, para correção da geometria do corpo de prova, foi de 0,384, de acordo com a norma UNE 83988-2 (2014).

Foram realizadas oito medidas na superfície lateral do corpo de prova, com um equipamento da MKII da CNS Farnell, depois foi obtida sua média e desvio padrão. A Figura 17 mostra a realização dos ensaios nos corpos de prova cilíndricos.

Figura 17 – Ensaio de resistividade elétrica superficial pelo Método de Wenner em corpo de prova cilíndrico



Fonte: autoria própria.

3.2.2 Ensaio das propriedades mecânicas do concreto

As propriedades mecânicas do concreto foram medidas com o objetivo de serem correlacionadas com ensaios não destrutivos, quais sejam resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Para cada idade do concreto estudado (3, 7, 28, 90 e 120 dias), foram ensaiados três corpos de prova cilíndricos tanto para determinar a resistência à compressão como para determinar a resistência à tração.

Para encontrar a resistência à compressão, as orientações da norma NBR 5738 (ABNT, 2007) foram seguidas. Para o rompimento de todos os corpos de prova cilíndricos foi feito uso de uma almofada de neoprene confinado, de 10 cm de diâmetro e 0,10 cm de espessura com dureza de 68 shore A, sendo confinada num disco metálico rígido.

Apesar deste sistema de capeamento não ser normalizado pela Associação de Brasileira de Normas Técnicas, ele é amplamente utilizado e existe bibliografia suficiente para garantir compatibilidade desse procedimento com os tradicionais, a exemplo de Chies *et al.* (2013), os quais confirmam a eficácia da almofada de neoprene para determinação da resistência à compressão do concreto.

A Figura 18 mostra a realização do ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos.

Figura 18 – Ensaio de resistência à compressão



Fonte: autoria própria.

Em relação a resistência à tração por compressão diametral, os corpos de prova foram ensaiados conforme a norma NBR 7222 (ABNT, 2011).

A Figura 19 mostra a realização do ensaio de resistência à tração nos corpos de prova cilíndricos.

Figura 19 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral



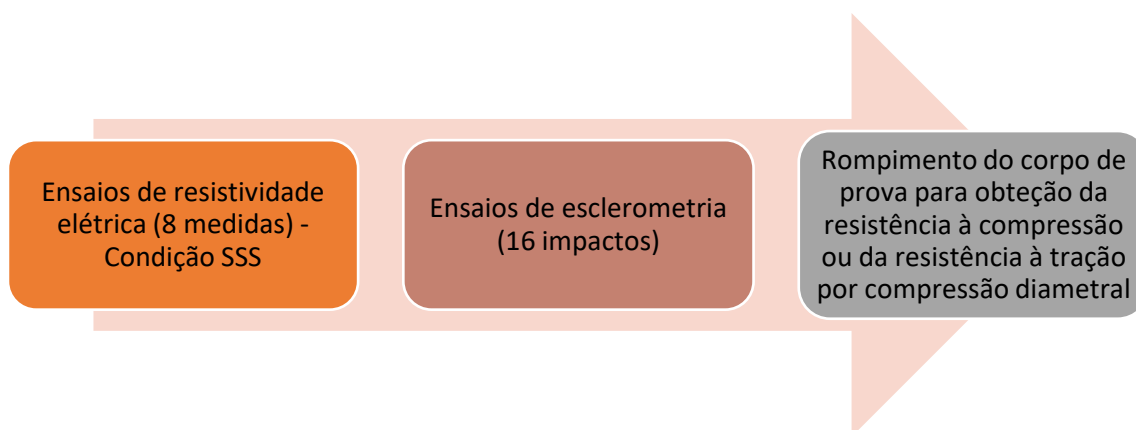
(a)

(b)

Fonte: autoria própria.

A sequência que contempla os ensaios realizados em um mesmo corpo de prova é apresentada na Figura 20, para melhor compreensão do planejamento.

Figura 20 – Sequência de ensaios realizados em um mesmo corpo de prova de concreto



Fonte: autoria própria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização dos materiais

As duas centrais de concreto forneceram todos os materiais, agregados e cimentos, para a realização dos ensaios de caracterização, como também concederam os traços dos concretos utilizados nesta pesquisa.

4.1.1. Agregados miúdos

Os resultados do ensaio de determinação da composição granulométrica para os três tipos de agregados miúdos encontram-se resumidos na Tabela 3.

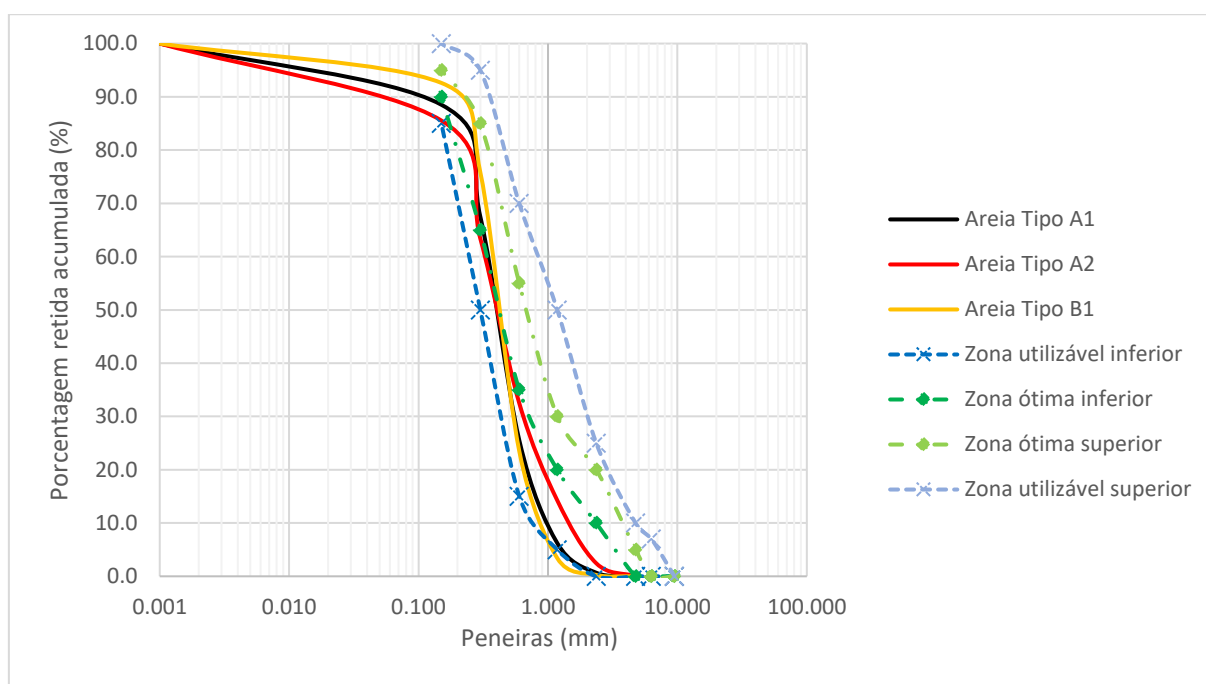
Tabela 3 - Composição granulométrica para os três tipos de agregados miúdos

Peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada (%)		
	Areia Tipo A1	Areia Tipo A2	Areia Tipo B1
4,75	0,0	0,0	0,0
2,36	0,7	2,4	0,3
1,18	6,2	14,2	3,4
0,60	25,5	32,5	23,5
0,30	67,5	63,4	75,8
0,15	88,5	85,6	92,6
Fundo	100,0	100,0	100,0
Dimensão máxima característica (mm)	2,36	2,36	1,18
Módulo de finura	1,88	1,98	1,96

Fonte: autoria própria.

A partir dos resultados de porcentagem de massa retida acumulada, foram construídas as seguintes curvas granulométricas (Figura 21) para os agregados miúdos.

Figura 21 – Curva granulométrica para os agregados miúdos



Fonte: autoria própria.

Ao analisar os resultados acima, é possível verificar que todos os agregados miúdos se encontram na zona utilizável inferior, tanto pela verificação das curvas granulométricas como pelos valores do módulo de finura, que estão entre 1,55 e 2,20, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

As demais propriedades das areias são apresentadas na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Massa específica, massa unitária e material pulverulento das areias

Central de concreto	Areia	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Material Pulverulento (%)
A	Tipo 1	2,64	1,61	3,59
	Tipo 2	2,67	1,71	4,53
B	Tipo 1	2,62	1,56	2,21

Fonte: autoria própria.

Todos os valores de material pulverulento são aceitáveis, pois estão abaixo do limite máximo aceitável para agregados miúdos, referente aos concretos protegidos do desgaste superficial que é de 5%, conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009).

4.1.2. Agregados graúdos

Os resultados do ensaio de determinação da composição granulométrica para os quatros tipos de agregados graúdos encontram-se resumidos na Tabela 5.

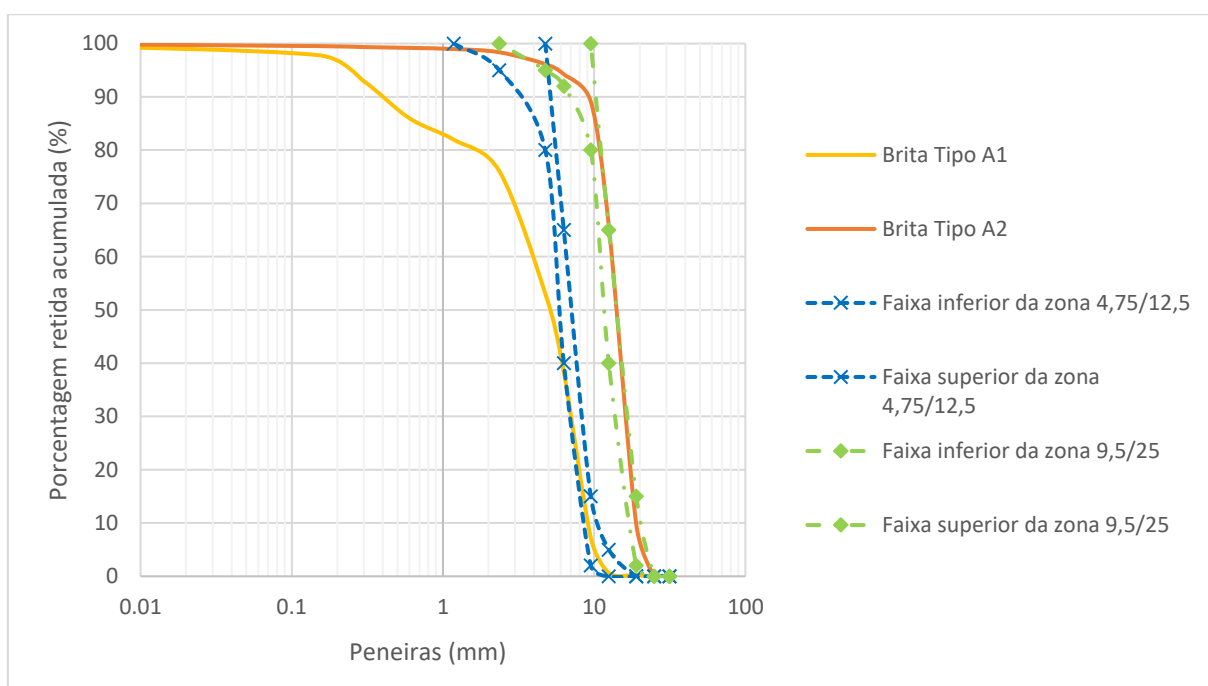
Tabela 5 - Composição granulométrica para os quatros tipos de agregados graúdos

Peneiras (mm)	Porcentagem retida acumulada (%)			
	Brita Tipo A1	Brita Tipo A2	Brita Tipo B1	Brita Tipo B2
31,50	0,0	0,0	0,0	0,0
25,00	0,0	0,0	0,0	2,3
19,00	0,2	9,7	0,0	22,7
12,50	0,6	65,7	0,6	85,8
9,50	7,2	89,1	24,9	99,0
6,30	38,3	94,2	80,8	99,9
4,75	53,1	96,1	94,8	99,9
2,36	76,0	98,4	99,7	99,9
1,18	82,0	99,0	99,8	99,9
0,60	86,0	99,2	99,8	99,9
0,30	92,9	99,3	99,8	99,9
0,15	97,8	99,5	99,8	99,9
Fundo	100,0	100,0	100,0	100,0
Zona granulométrica (d/D)	-	9,5/25	4,75/12,5	9,5/25
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	25	12,5	25
Módulo de finura	5,34	8,5	7	9,1

Fonte: autoria própria.

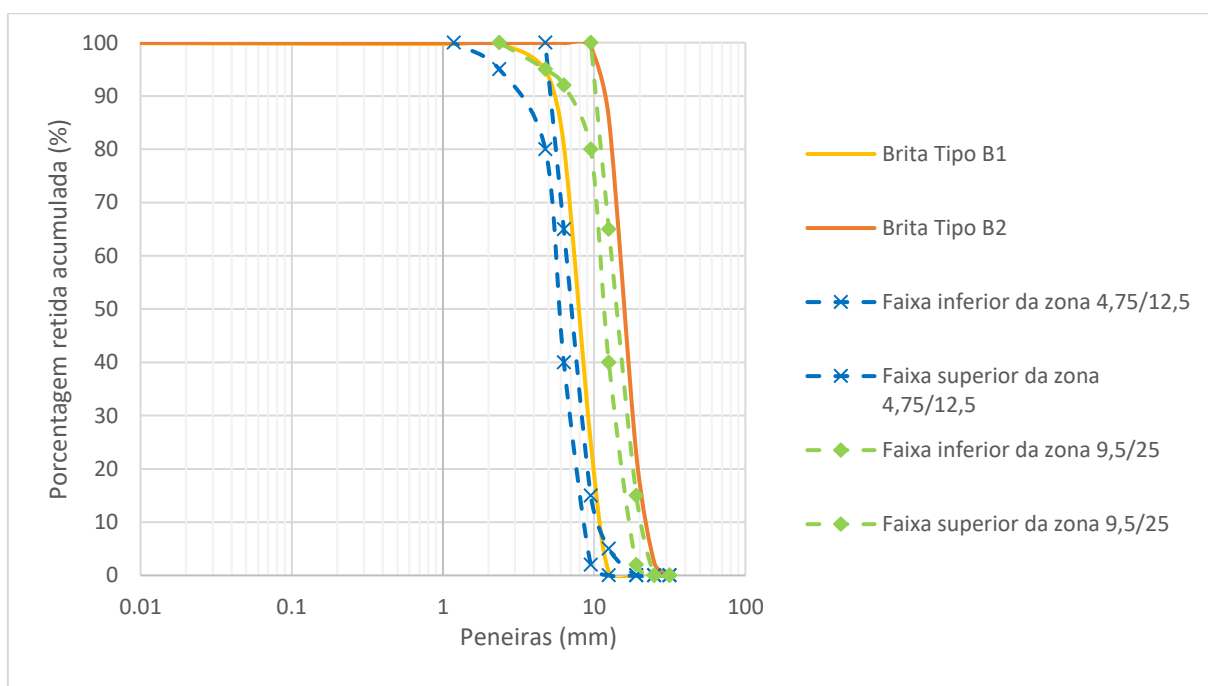
A partir dos resultados de porcentagem de massa retida acumulada, foram construídas as seguintes curvas granulométricas (Figuras 22 e 23) para os agregados graúdos.

Figura 22 – Curvas granulométricas das britas da Central de concreto A



Fonte: autoria própria.

Figura 23 – Curvas granulométricas das britas da Central de concreto B



Fonte: autoria própria.

O agregado gráúdo da Central de concreto A, denominado Brita Tipo A1, devido a presença de excessiva de finos, não pode ser enquadrado em nenhuma zona granulométrica. Os outros agregados gráúdos foram enquadrados como informado na

Tabela 5, lembrando que as zonas granulométricas 4,75/12,5 e 9,5/25, referem-se às antigas classificações brita 0 e brita 1, respectivamente.

As demais propriedades dos agregados graúdos são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Massa específica, massa unitária e material pulverulento das britas

Central de concreto	Brita	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária (g/cm ³)	Material Pulverulento (%)
A	Tipo 1	2,77	1,65	4,76
	Tipo 2	2,78	1,52	0,42
B	Tipo 1	2,76	1,43	0,34
	Tipo 2	2,77	1,46	0,12

Fonte: autoria própria.

A porcentagem de material pulverulento referente a Brita Tipo A1 confirma a presença excessiva de finos. Esse valor é muito superior ao limite máximo aceitável para agregados graúdos, que é de 1%, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009).

O valor de referência possui a função de viabilizar a seleção de agregado graúdo mais adequado e com maior qualidade para a fabricação do concreto. Sabe-se que a presença de material fino acarreta uma maior necessidade de água de amassamento, podendo promover uma queda na resistência do concreto, caso a dosagem não for realizada de maneira adequada. Contudo, todas as britas restantes apresentaram valores de material pulverulento aceitáveis.

4.1.3. Cimentos

Os cimentos utilizados nas duas usinas de concreto são do tipo CP V-ARI. Porém, são de fabricantes diferentes. Os resultados de massa específica e de superfície específica pelo método de Blaine estão na Tabela 7.

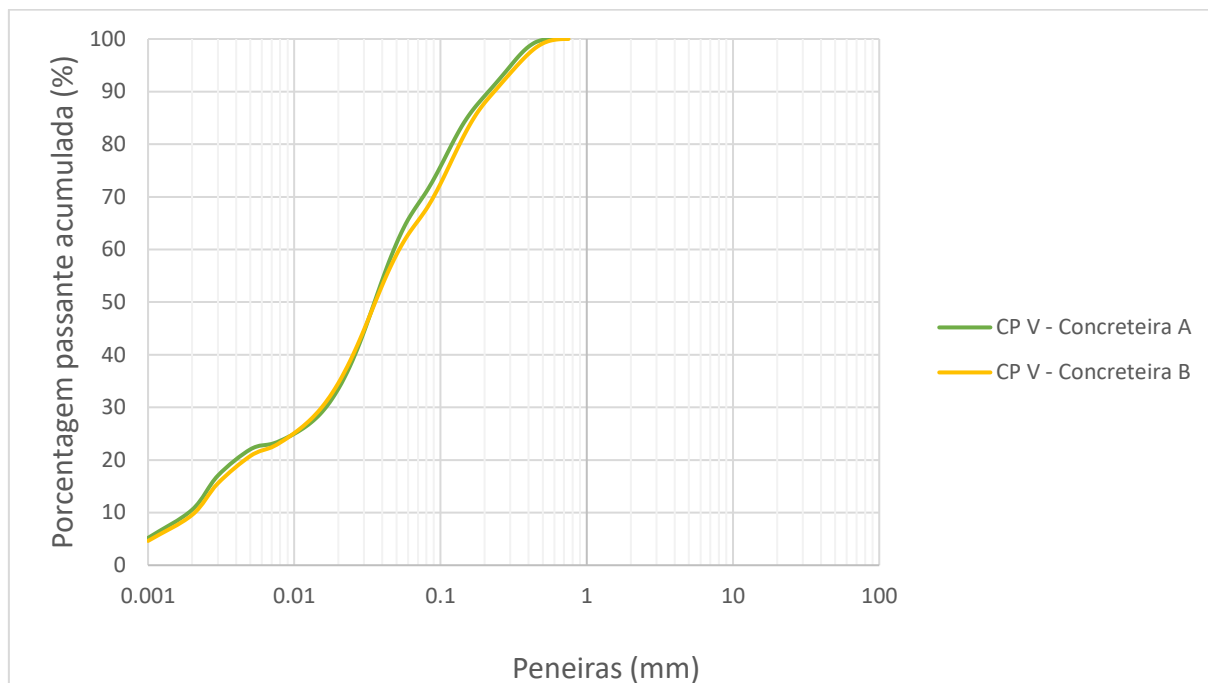
Tabela 7 – Massa específica e superfície específica (Blaine) dos cimentos

Central de concreto	Tipo do cimento	Massa específica (g/cm ³)	Superfície específica (cm ² /g)
A	CP V - ARI	3,07	3855,63
B	CP V - ARI	3,08	3377,34

Fonte: autoria própria.

Em relação a composição granulométrica dos cimentos, realizado por granulometria a laser via seco, foram obtidos os seguintes resultados:

Figura 24 – Curvas granulométricas dos cimentos



Fonte: autoria própria.

Verifica-se por análise das superfícies específicas e das curvas granulométricas, que o cimento da Central de concreto A é ligeiramente mais fino do que o da Central de concreto B.

Por último, a Tabela 8 fornece os resultados da análise química para os dois cimentos.

Tabela 8 – Análise química dos cimentos

Componente	Cimento A	Cimento B
Óxido de cálcio (CaO)	59,33%	58,51%
Dióxido de silício (SiO ₂)	24,99%	25,49%
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	4,05%	5,89%
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	3,91%	4,55%
Óxido sulfúrico (SO ₃)	3,76%	2,42%
Óxido de magnésio (MgO)	2,33%	1,98%
Pentóxido de fósforo (P ₂ O ₅)	0,48%	0,03%
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,46%	0,44%
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,33%	0,28%

Fonte: autoria própria.

Tabela 8 – Análise química dos cimentos (Continuação)

Componente	Cimento A	Cimento B
Óxido de potássio (K_2O)	0,33%	0,20%
Óxido de estrôncio (SrO)	0,10%	0,04%
Óxido de manganês (MnO)	0,04%	0,14%
Cloreto (Cl)	0,03%	nd
Óxido de cromo (Cr_2O_3)	0,03%	nd
Óxido de zinco (ZnO)	0,02%	nd
Dióxido de zircônio (ZrO_2)	nd	0,02%
Óxido de níquel (NiO)	nd	0,02%

Fonte: autoria própria.

Por meio desses resultados, verifica-se, em relação aos componentes comuns, que as respectivas quantidades são próximas, infere-se, então, que os cimentos são semelhantes quimicamente.

4.1.4. Concretos

Os traços dos concretos foram fornecidos pelas empresas no formato que utilizam no processo de fabricação e, por isso, necessitaram ser transformados em traços unitários em massa. Como a Central de concreto A forneceu o traço com todos os componentes em quilo, a transformação foi, simplesmente, dividir todos os componentes pelo valor da massa do cimento (Tabela 9).

Tabela 9 – Traços dos concretos (Central de concreto A)

Classe	Traço fornecido pela Central de concreto A em kg*	Traço unitário em massa*
C30	304 : 0 : 875 : 720 : 325 : 165	1 : 0 : 2,88 : 1,07 : 2,37 : 0,54
C40	393 : 0 : 798 : 680 : 315 : 176	1 : 0 : 2,03 : 0,80 : 1,73 : 0,45
C50	497 : 350 : 350 : 615 : 320 : 205	1 : 0,70 : 0,70 : 0,64 : 1,24 : 0,41

*Composição do traço unitário em massa: $c : mA1 : mA2 : gA1 : gA2 : a/c$, onde: c = cimento (kg); $mA1$ = agregado miúdo A1 (kg); $mA2$ = agregado miúdo A2 (kg); $gA1$ = agregado graúdo A1 (kg); $gA2$ = agregado graúdo A2 (kg); a/c = relação água/cimento.

Fonte: autoria própria.

A Central de concreto B forneceu o traço na nota fiscal entregue a empresa compradora do respectivo concreto. Porém, os componentes do concreto não são

apresentados na mesma unidade. As transformações necessárias para encontrar o traço unitário em massa encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Traços dos concretos (Central de concreto B)

Classe	Traço fornecido pela Central de concreto B em unidades diferentes	Traço fornecido pela Central de concreto B em Kg	Traço unitário em massa
C30	Cimento = 2.400,00 kg/ Areia = 4,80 m ³ / Brita B1 + Brita B2* = 5,60 m ³ para caminhão betoneira de 8 m ³	Cimento = 2.400,00 kg/ Areia = 7.488 kg/ Brita B1 + Brita B2 = 8.092 kg	1 : 3,12 : 3,37
C40	Cimento = 2.160,00 kg/ Areia = 4,20 m ³ / Brita B1 + Brita B2* = 5,40 m ³ para caminhão betoneira de 6 m ³	Cimento = 2.160,00 kg/ Areia = 6.552 kg/ Brita B1 + Brita B2 = 7.803 kg	1 : 3,03 : 3,61
C50	Cimento = 2.736,00 kg/ Areia = 3,60 m ³ / Brita B1 + Brita B2* = 4,20 m ³ para caminhão betoneira de 6 m ³	Cimento = 2.736,00 kg/ Areia = 5616 kg/ Brita B1 + Brita B2 = 6.069 kg	1 : 2,05 : 2,22

*Foi fornecido somente o volume total da mistura de agregados graúdos (Brita B1 + Brita B2). A transformação do traço foi feita a partir da média das duas massas unitárias.

Fonte: autoria própria.

Em toda concretagem, foi realizado o ensaio de consistência ("slump test") antes da moldagem dos corpos de prova. Os valores de "slump test", assim como a data de cada concretagem, estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedade do concreto fresco

Central de concreto	Classe	Data da concretagem	Consistência ("slump test") (cm)
A	C30	09/06/2017	15
	C40	28/09/2017	15
	C50	11/09/2017	11,5
B	C30	22/09/2017	11,5
	C40	20/07/2017	9,5
	C50	16/10/2017	13

Fonte: autoria própria.

4.2. Propriedades mecânicas do concreto

Nesta pesquisa, visando uma maior confiabilidade dos resultados pretendidos, decidiu-se utilizar todos os valores obtidos para a resistência à compressão e resistência à tração. Dessa forma, os valores médios de resistência de um concreto, em uma idade específica, são mais representativos dos dados obtidos para analisar o crescimento da propriedade com o tempo.

Esses valores médios foram calculados após a aplicação do teste de Chauvenet. Esse critério foi aplicado objetivando a eliminação de dados espúrios, ou seja, eliminação dos valores de resistência, em determinada idade, que desviam do padrão do conjunto de valores ao qual pertencem.

O teste de Chauvenet estabelece que uma medida x_i deve ser eliminada, se o valor de r calculado pela Equação 6 for maior que o valor de R_c dado no Quadro 7 em função do número de medições efetuadas.

$$r = \frac{|x_i - \bar{X}|}{s(X)} \quad (6)$$

onde:

x_i = medida individual de um conjunto de dados;

$\bar{X}$ = valor médio de um conjunto de dados;

$s(X)$ = desvio padrão de um conjunto de dados.

Quadro 7 – Critério de Chauvenet

Número de medições	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_c	-	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,85	1,91	1,96

Fonte: Oliveira (2008).

Após a eliminação de uma determinada medida, é necessário refazer o cálculo do r , desconsiderando o valor eliminado, para confirmar ou não a necessidade de eliminação de mais outra medida.

Essa pesquisa obteve três valores de resistência para cada concreto estudado, em determinada idade. Esse critério foi aplicado ao conjunto formado pela reunião dos

valores de resistência de concretos de mesma classe (C30/C40/C50), com mesma idade (3, 7, 28, 90 e 120 dias) e de centrais de concreto diferentes (A e B).

4.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão média foi calculada após aplicação do Teste de Chauvenet, o qual promoveu a eliminação de somente dois valores, sendo um do concreto C40-A aos 28 dias e o outro do concreto C50-B aos 120 dias.

A partir dos valores de resistência à compressão média (f_{cm}), foi obtida uma curva resistência à compressão versus idade para cada concreto utilizado, a fim de se analisar o crescimento da propriedade com o tempo (Figuras 25 e 26).

O programa OriginPro 8 foi utilizado com o propósito de construir as seis curvas, aplicando-se, sobre os valores de resistência à compressão média, a relação da Equação 7 sugerida Código Modelo CEB-FIP (1990 *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2008), para corpos de prova curados a uma temperatura média de 20°C.

$$f_{cm}(t) = \exp\left(s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}}\right)\right)f_{cm} \quad (7)$$

onde:

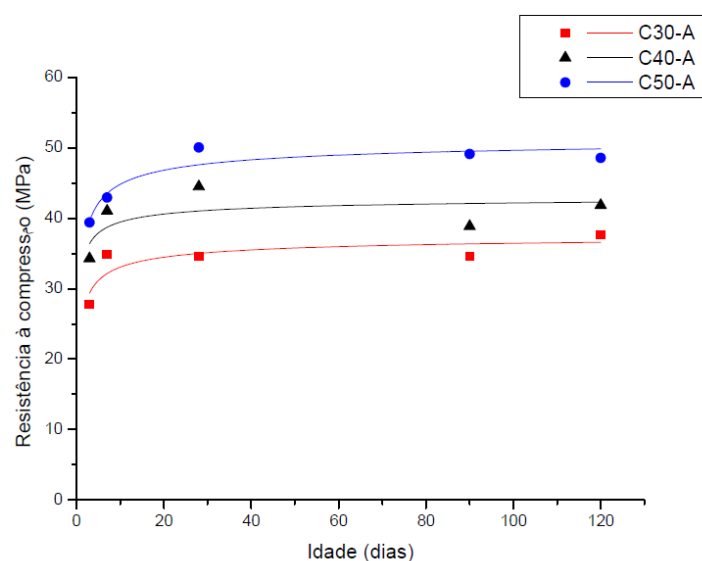
$f_{cm}(t)$ = resistência média à compressão com idade de t dias;

f_{cm} = resistência média à compressão aos 28 dias;

s = coeficiente relacionado ao tipo de cimento, como: $s = 0,20$ para cimentos de alta resistência inicial; $s = 0,25$ para cimentos de endurecimento normal; $s = 0,38$ para cimento de endurecimento lento;

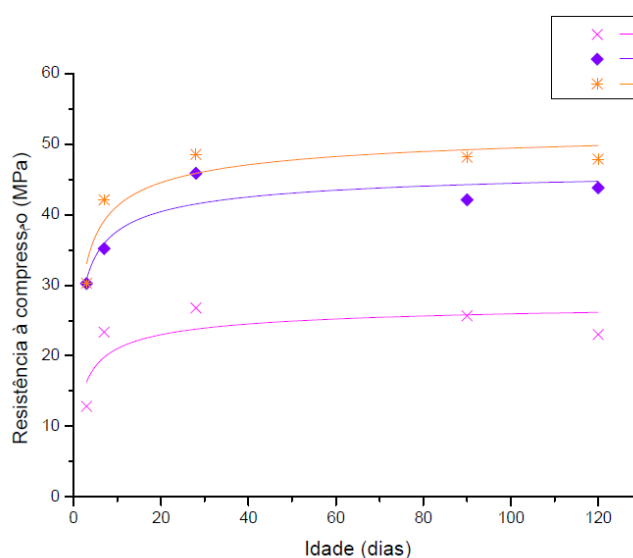
$t_1 = 1$ dia.

Figura 25 – Evolução da resistência à compressão média (f_{cm}) com a idade (Central de concreto A)



Fonte: autoria própria.

Figura 26 – Evolução da resistência à compressão média (f_{cm}) com a idade (Central de concreto B)



Fonte: autoria própria.

As Figuras 25 e 26 evidenciam a mesma tendência para as seis curvas, todas são crescentes e apresentam um formato achatado após os 7 primeiros dias, fato que se deve ao tipo de cimento utilizado (CP V – ARI: alta resistência inicial). Após as primeiras idades, a resistência à compressão praticamente se estabiliza. Porém, como pode ser verificado pelas Figuras 25 e 26, ocorreram algumas oscilações nas idades de 90 e 120

dias, devido, provavelmente, às variações que ocorrem comumente na etapa de moldagem dos corpos de prova, como: diferença na quantidade de agregado graúdo da amostra, diferença na quantidade de vazios por falta de um adensamento mais adequado, entre outros. Contudo, infere-se que são oscilações mínimas e não significativas, pois as seis curvas construídas apresentam um formato crescente e esperado para concretos fabricados com cimento do tipo CP V – ARI.

Na Figura 26, percebe-se também que o concreto C30-B não alcançou a resistência à compressão esperada aos 28 dias, ou seja, valor maior ou igual a 30 MPa. Apesar dessa constatação, o concreto não foi descartado na pesquisa.

4.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração média por compressão diametral foi calculada após aplicação do Teste de Chauvenet, o qual promoveu a eliminação de somente um valor, sendo esse do concreto C50-A aos 28 dias.

A partir dos valores de resistência à tração média (f_{ctm}), foi obtida uma curva resistência à tração versus idade para cada concreto utilizado, a fim de se analisar o crescimento da propriedade com o tempo (Figuras 27 e 28).

O programa OriginPro 8 foi utilizado com o propósito de construir as seis curvas, aplicando-se, sobre os valores de resistência à tração média, a relação da Equação 8, sugerida Código Modelo CEB-FIP (1990 *apud* MEHTA e MONTEIRO, 2008), para corpos de prova curados a uma temperatura média de 20°C:

$$f_{ctm}(t) = \left(\exp \left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right) \right) \right)^{2/3} \cdot f_{ctm} \quad (8)$$

onde:

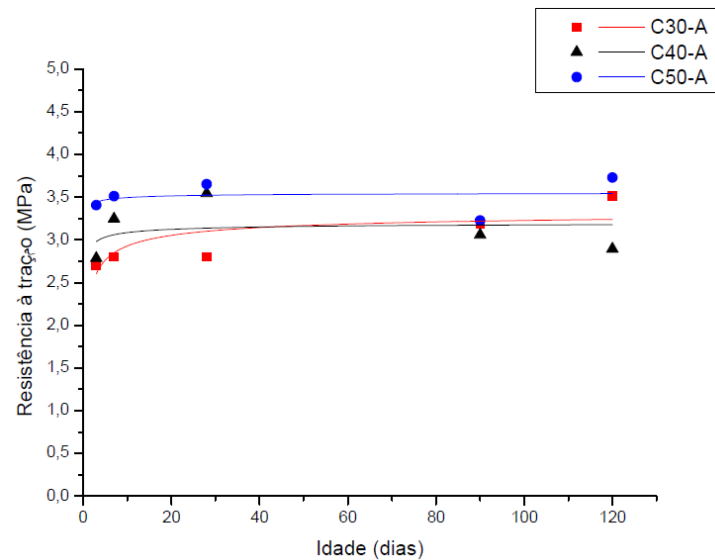
$f_{ctm}(t)$ = resistência média à tração com idade de t dias;

f_{ctm} = resistência média à tração aos 28 dias;

s = coeficiente relacionado ao tipo de cimento, como: $s = 0,20$ para cimentos de alta resistência inicial; $s = 0,25$ para cimentos de endurecimento normal; $s = 0,38$ para cimento de endurecimento lento;

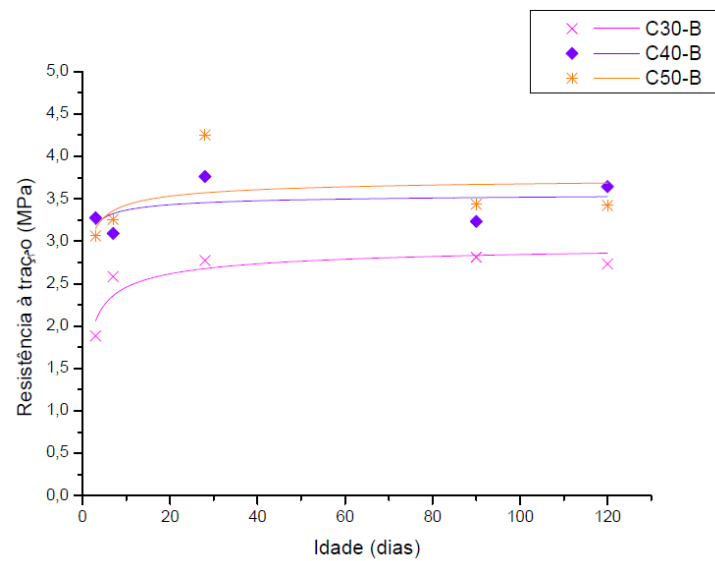
$t_1 = 1$ dia.

Figura 27 – Evolução da resistência à tração média (f_{ctm}) com a idade (Central de concreto A)



Fonte: autoria própria.

Figura 28 – Evolução da resistência à tração média (f_{ctm}) com a idade (Central de concreto B)



Fonte: autoria própria.

As Figuras 27 e 28 evidenciam que o crescimento da resistência à tração com a idade não ocorre com a mesma proporção que as curvas de resistência à compressão. Com o passar do tempo, a resistência à tração não apresenta um aumento significativo. Essa situação já era esperada, pois como a resistência à tração corresponde à 10% da resistência à compressão, há também pouco ganho de resistência a longo do tempo.

Entretanto, a Figura 27 apresenta curvas praticamente constantes para os concretos C40-A e C50-A. Isso é notado também na curva C40-B da Figura 28. Essas constatações podem ser devido a esse pouco ganho de resistência a longo do tempo, prejudicado ainda mais por oscilações das resistências nas idades de 90 e 120 dias.

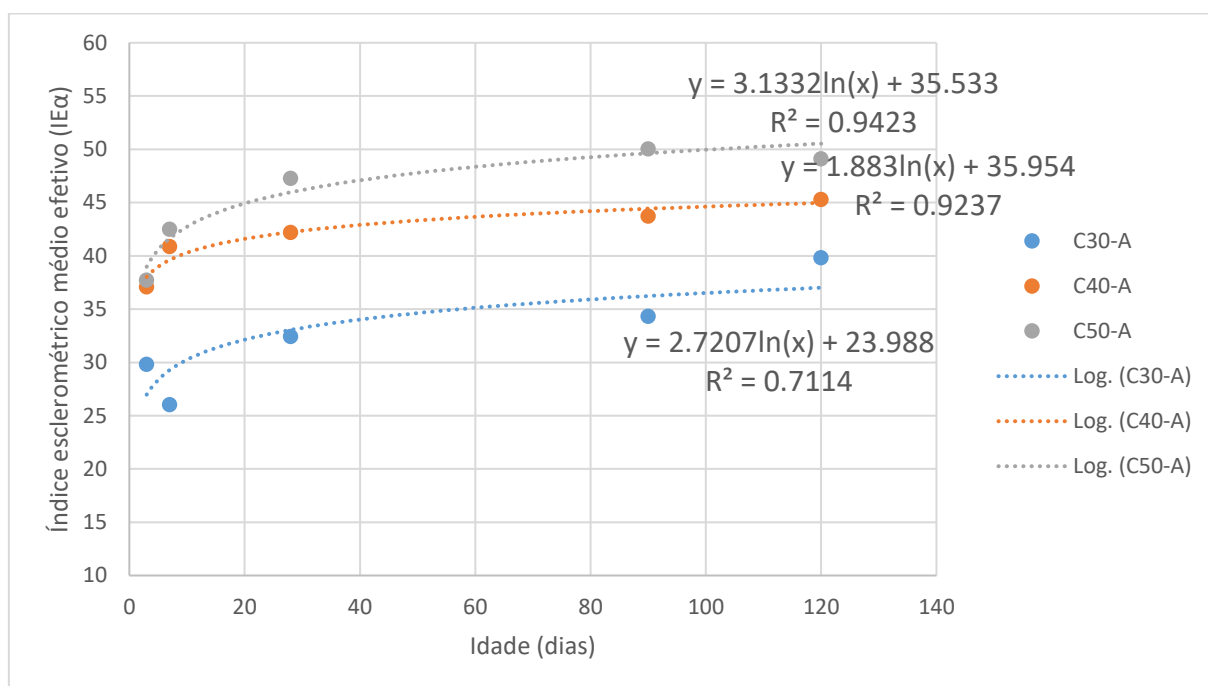
4.3. Ensaaios não destrutivos

4.3.1. Esclerometria

A partir dos valores de índices esclerométricos médios efetivos ($IE\alpha$), foi obtida uma curva $IE\alpha$ versus idade para cada concreto utilizado, a fim de se analisar o crescimento da medida em relação ao tempo (Figuras 29 e 30).

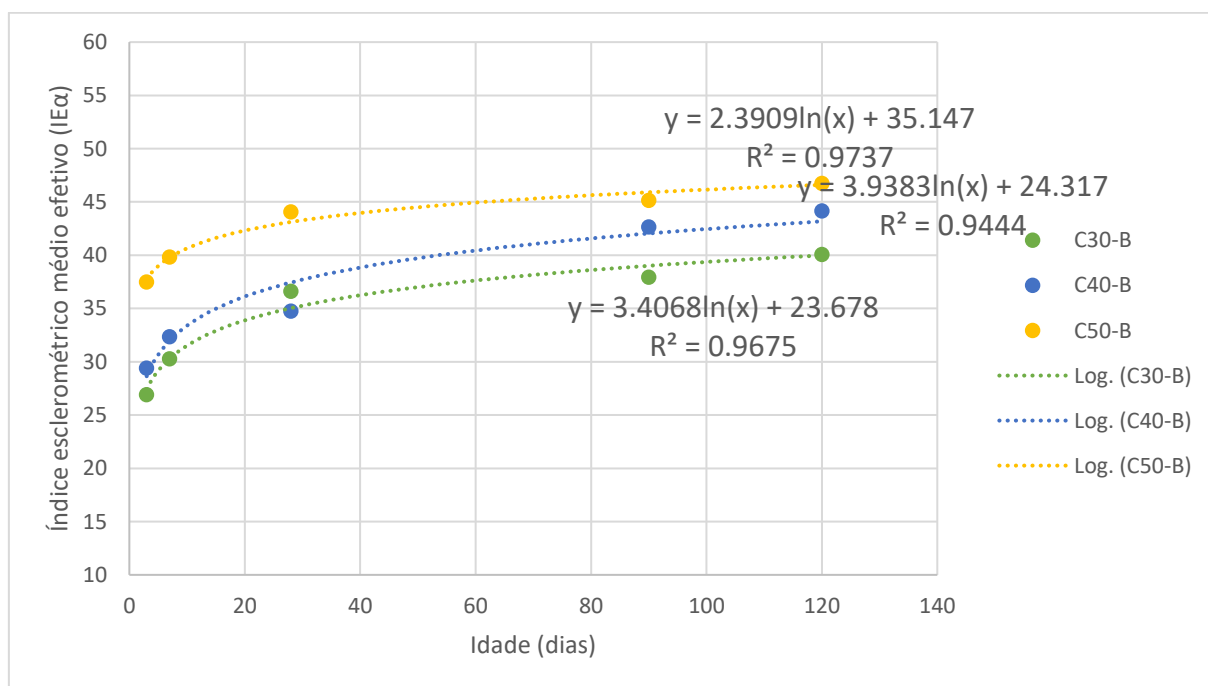
O programa Excel 2013 foi utilizado com o propósito de construir as seis curvas, aplicando-se, sobre os valores de índices esclerométricos médios efetivos, a função logarítmica ($y = a \cdot \ln(x) + b$), a qual apresentou o maior coeficiente de determinação (r^2).

Figura 29 - Evolução do índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$) com a idade (Central de concreto A)



Fonte: autoria própria.

Figura 30 - Evolução do índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$) com a idade (Central de concreto B)



Fonte: autoria própria.

As Figuras 29 e 30 evidenciam a mesma tendência para as seis curvas. Todas são crescentes, contudo, aumentam mais rapidamente dos 3 aos 28 dias do que após os 28 dias. As curvas possuem uma tendência de crescimento semelhante às curvas de resistência à compressão versus idade.

A curva para o concreto C30-A foi a que apresentou o menor r^2 , o que pode ser atribuído a uma queda no valor do índice esclerométrico médio efetivo aos 7 dias, causada por problema não identificado na realização do ensaio, mas que pode estar relacionado ao uso de distintos corpos de prova, como se esclarece no parágrafo seguinte.

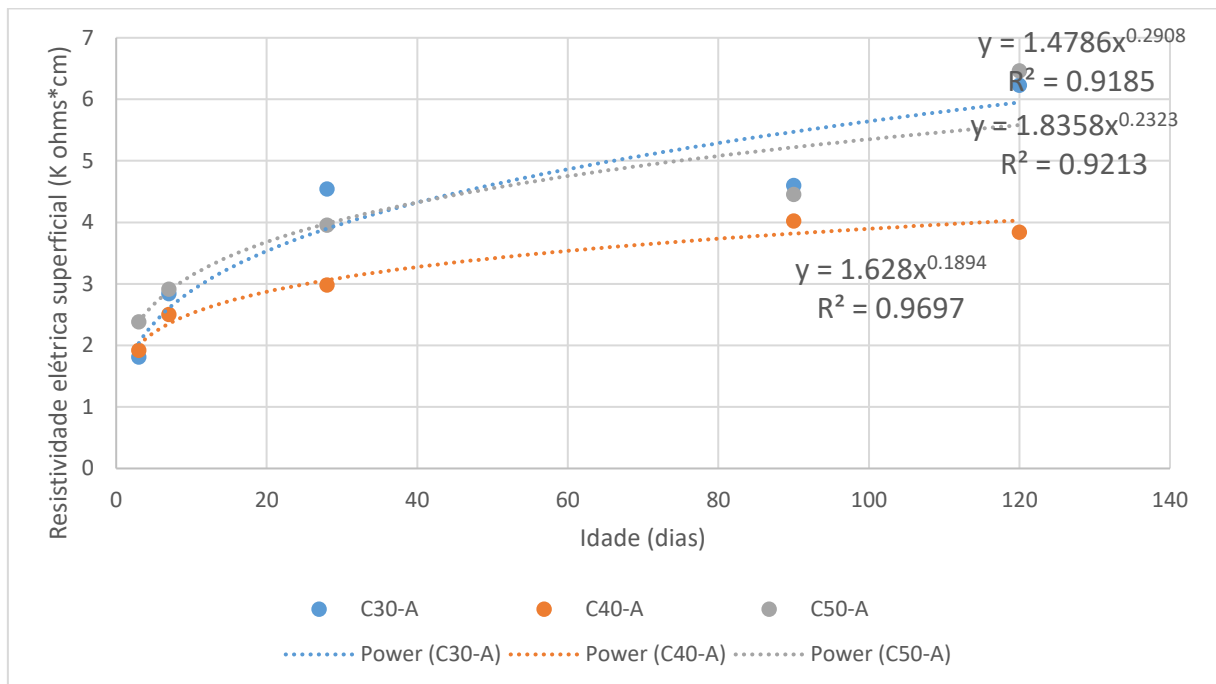
Os valores de IE α utilizados para a construção das seis curvas, foram encontrados por meio das médias dos IE α medidos nos corpos de prova rompidos à compressão axial e à compressão diametral. O impacto do esclerometro deve ser executado com distância mínima de 3 cm entre os centros de dois pontos de impacto. Diante disso, as medidas utilizadas não puderam ser feitas continuamente nos mesmos corpos de prova, diferentemente, do ensaio de resistividade elétrica superficial.

4.3.2. Resistividade elétrica superficial

A avaliação das medidas de resistividade elétrica superficial (RES) com relação ao tempo, procedeu-se de maneira diferente dos outros ensaios. Foram construídas curvas RES versus idade para cada concreto, a partir de medidas realizadas continuamente nos mesmos dois corpos de prova nas cinco idades pré-estabelecidas (3, 7, 28, 90 e 120 dias), ou seja, as amostras não foram rompidas por ensaios destrutivos.

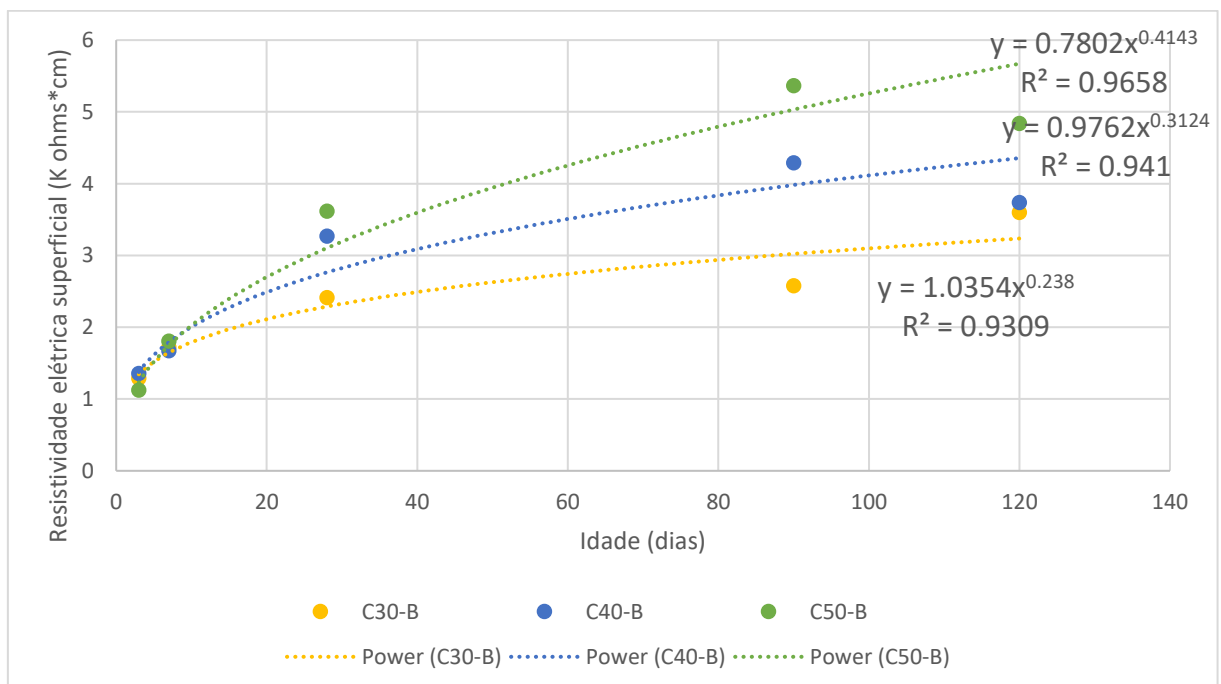
O programa Excel 2013 foi utilizado com o propósito de construir as seis curvas para análise do crescimento das medidas de resistividade em relação ao tempo (Figuras 31 e 32). Aplicando-se, sobre os valores de resistividade elétrica, a função potencial ($y = a \cdot x^b$), a qual apresentou o maior coeficiente de determinação (r^2).

Figura 31 - Evolução da resistividade elétrica superficial (RES) com a idade (Central de concreto A)



Fonte: autoria própria.

Figura 32 - Evolução da resistividade elétrica superficial (RES) com a idade (Central de concreto B)



Fonte: autoria própria.

As Figuras 31 e 32 evidenciam a mesma tendência de crescimento para as seis curvas. Entretanto, a curva do concreto C30-A (Figura 31) apresentou um crescimento maior do que a curva do concreto C50-A, o que não era esperado para um concreto com menor resistência à compressão (Figura 31). Um concreto com resistência à compressão elevada, significa que o grau de hidratação do cimento foi maior, consequentemente, possui menor porosidade, devendo, então, apresentar resistividade elétrica maior.

Contudo, essa situação evidencia que não é só a porosidade da pasta que exerce influência nas medidas de resistividade elétrica. Ao analisar os traços padrões dos concretos da Central de concreto A, verifica-se que: C30-A possui 36% a mais de agregado graúdo do que o C40-A; C30-A possui 85% a mais de agregado graúdo do que o C50-A. Essa situação é explicada por Sengul (2014), que afirma que o aumento na quantidade de agregado graúdo e a redução na pasta de cimento resultam em valores mais elevados de resistividade elétrica superficial. Entende-se, então, que as medidas de resistividade elétrica são influenciadas por diversos fatores e, que para cada concreto é necessária uma análise individual para compreender qual fator exerce maior interferência nessas medidas.

4.4. Curvas de correlação

As curvas de correlação possibilitam a estimativa de uma propriedade mecânica do concreto (resistência à compressão ou resistência à tração por compressão diametral) a partir de determinada medida obtida por ensaio não destrutivo (esclerometria ou resistividade elétrica superficial).

Essas curvas foram geradas por meio de tratamento estatístico dos dados individuais medidos, após a eliminação dos dados espúrios (Teste de Chauvenet) presentes nos valores de resistência à compressão e à tração. Foram utilizados os valores individuais, visto que o concreto, por ser um material heterogêneo, apresenta para cada corpo de prova ensaiado, uma medida específica representativa daquela amostra.

Com o intuito de propor curvas que representem a correlação entre as grandezas medidas nos ensaios não destrutivos e as propriedades mecânicas do concreto, utilizou-se o método de regressão não linear simples com auxílio do programa Excel 2013. Esse programa

oferece meios rápidos e eficientes de se identificar o formato funcional que melhor se ajusta aos dados de uma amostra de valores de Y (resistência à compressão – fc ou resistência à tração – fct,sp) e de X (índice esclerométrico médio efetivo - IE α ou medida de resistividade elétrica superficial corrigida pelo coeficiente de correção de geometria - RES).

Primeiramente, os dados experimentais foram agrupados em cada classe (C30/C40/C50), ou seja, os valores de resistência do concreto C30-A foram reunidos aos valores de resistência do concreto C30-B e, assim, sucessivamente. Após a formação dos conjuntos, foram testadas as seguintes funções:

- a) Exponencial: $y = a \cdot e^{b \cdot x}$
- b) Linear: $y = a \cdot x + b$
- c) Logarítmica: $y = a \cdot \ln(x) + b$
- d) Potência: $y = a \cdot x^b$

A escolha da melhor curva de correlação foi baseada no critério de maior coeficiente de determinação (r^2), pois o modelo que apresenta o maior r^2 é aquele que melhor se ajusta aos dados analisados. Além disso, a grande maioria dos autores pesquisados dentro dessa temática, utilizam esse critério.

De acordo com Martins e Domingues (2017), a interpretação de r^2 ($0 \leq r^2 \leq 1$) poder ser feita da seguinte forma:

- Se $0,9 \leq r^2 < 1,00$ = alto poder de explicação do modelo;
- Se $0,8 \leq r^2 < 0,90$ = bom poder de explicação do modelo.
- Se $0,6 \leq r^2 < 0,80$ = médio poder de explicação do modelo.
- Se $r^2 < 0,60$ = poder de explicação do modelo ruim.

Posteriormente à escolha do modelo para cada classe, foram calculados os resíduos (Re) e os resíduos relativos em % (Re_r) por meio das Equação 9 e 10.

$$Re = Y_{\text{medido}} - Y_{\text{ajustado}} \quad (9)$$

$$Re_r = \frac{Y_{\text{medido}} - Y_{\text{ajustado}}}{Y_{\text{medido}}} \times 100 \quad (10)$$

onde:

Y_{medido} = valor da resistência à compressão ou à tração obtido experimentalmente (MPa);

Y_{ajustado} = valor da resistência à compressão ou à tração calculado por meio do modelo ajustado (MPa).

Os resíduos gerados são as diferenças entre os valores reais (Y_{medido}) e os estimados pelo modelo ajustado (Y_{ajustado}) (MARTINS e DOMINGUES, 2017). Quanto mais próximo de 0 ou 0%, mais próxima a curva gerada está do dado experimental. Diante disso, os dados que apresentaram resíduo relativo (Re_r) maior ou igual à 20% foram considerados suspeitos de serem “outliers”, ou seja, dados prejudiciais ao modelo. Também foram considerados suspeitos, dados visualmente distantes da curva.

Um “outlier” pode ser definido como um elemento que desvia de um padrão do conjunto de dados ao qual pertence (SILVA, 2004), porém isso não significa que ele precise ser eliminado categoricamente. É mais adequado avaliar, se o possível “outlier” prejudica ou não a curva escolhida. Essa avaliação foi feita através da verificação do aumento ou diminuição do valor do r^2 para a curva específica.

Comprovada a presença de “outliers”, estes foram eliminados e, uma nova curva foi gerada e os novos resíduos foram calculados.

Após a realização de todas essas etapas para cada classe do concreto, os dados experimentais remanescentes foram reunidos em um único conjunto e, o mesmo procedimento foi executado para a escolha de uma única curva de correlação para o conjunto das classes.

4.4.1. Resistência à compressão x Esclerometria (f_c x $IE\alpha$)

Nos estudos de regressão não linear simples, visando a escolha da curva que melhor representasse a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$), foram testados quatro modelos de correlação para cada classe de concreto (C30/C40/C50). No Quadro 8, estão dispostos os resultados de r^2 obtidos para cada uma das curvas.

Quadro 8 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão (f_c) e índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$)

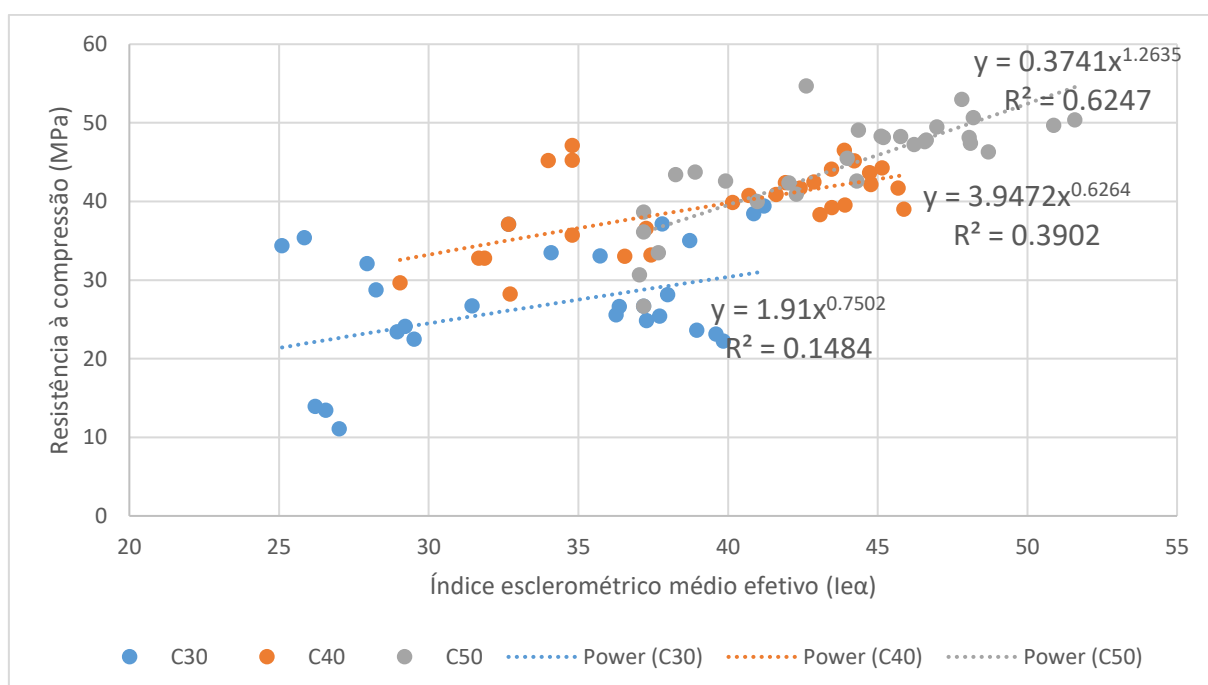
Tipo de curva	r^2		
	C30	C40	C50
Exponencial	0,1471	0,3781	0,6034
Linear	0,1173	0,349	0,6269
Logarítmica	0,1152	0,3596	0,6468
Potência	0,1484	0,3902	0,6247

Fonte: autoria própria.

A curva de correlação que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a gerada pela função potencial. De acordo com revisão da literatura deste trabalho, constata-se que as curvas mais indicadas por diversos autores para representar a relação f_c versus $IE\alpha$ são obtidas pelas funções do tipo potência e linear.

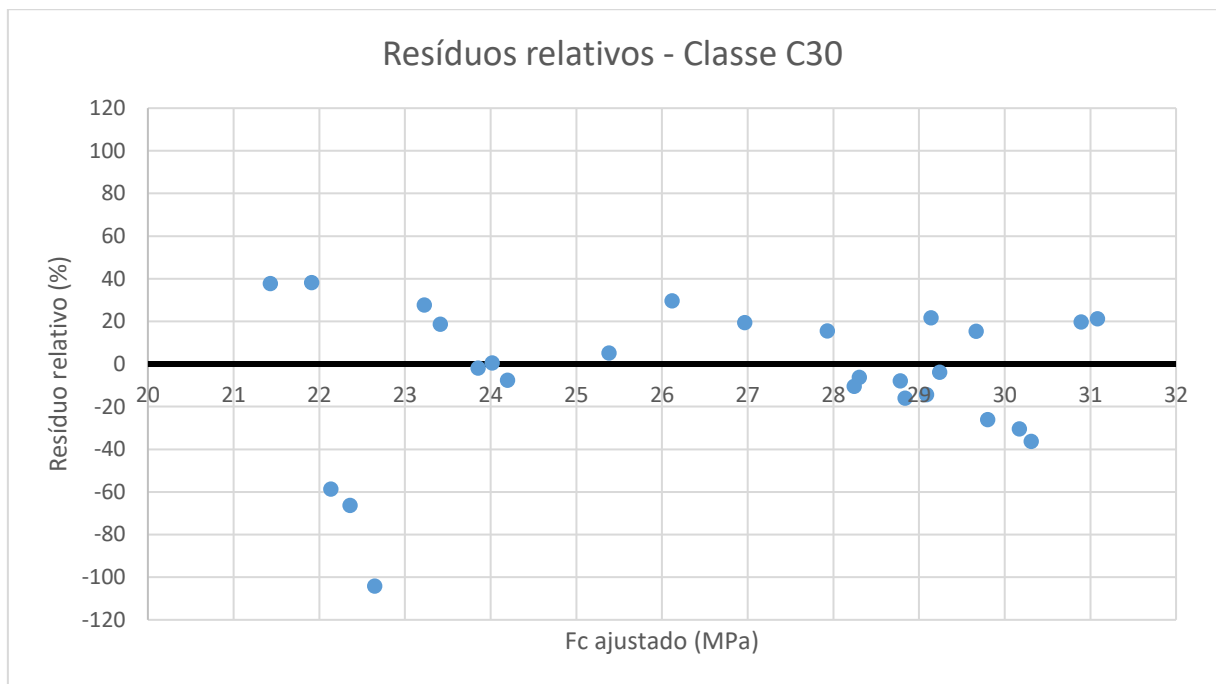
A Figura 33 mostra as três curvas escolhidas para representar a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Nas Figuras 34, 35 e 36, são representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados para cada classe do concreto.

Figura 33 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para cada classe do concreto



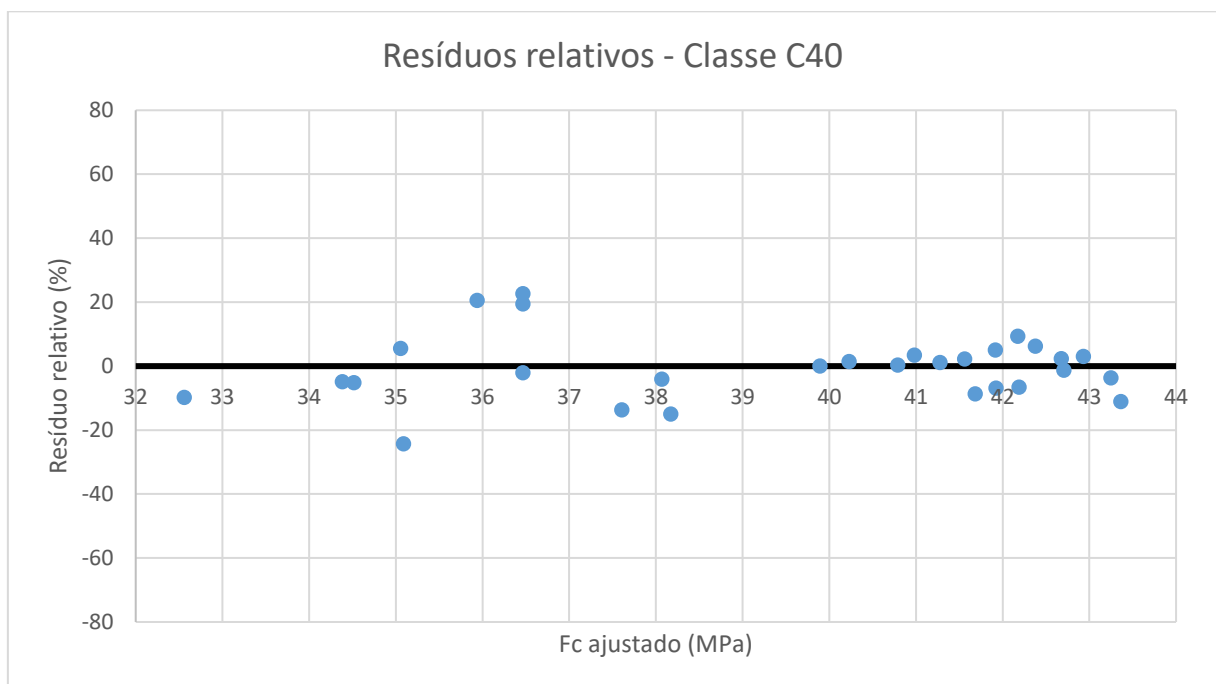
Fonte: autoria própria.

Figura 34 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30



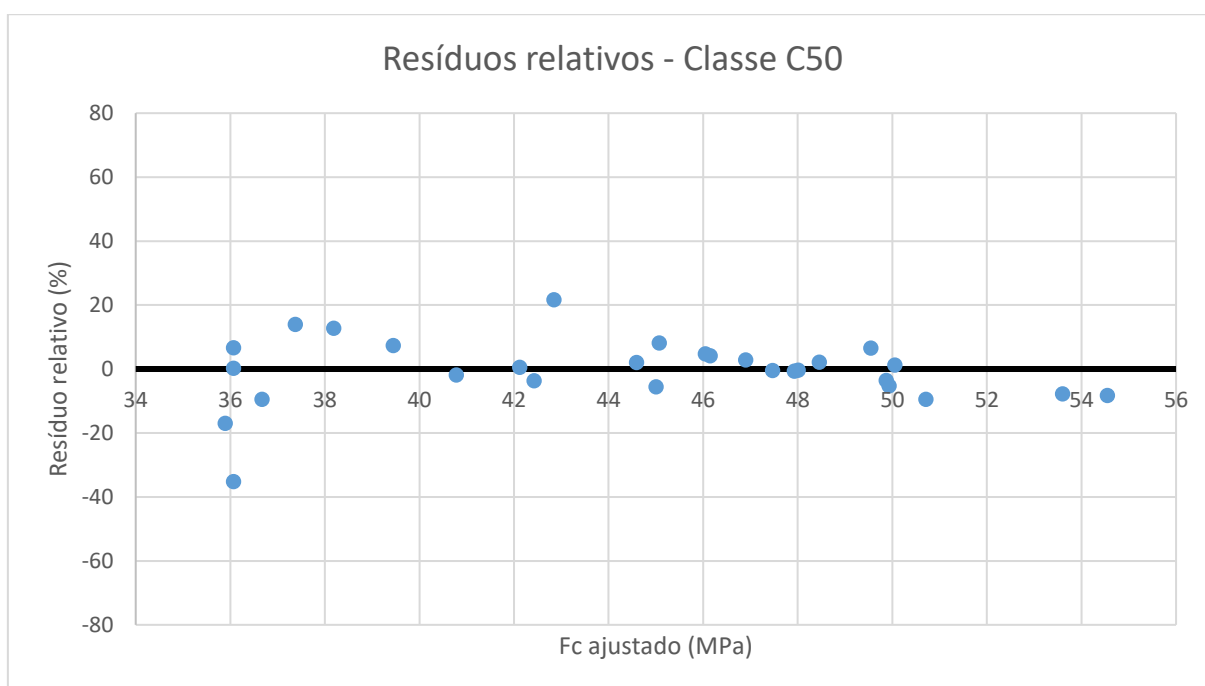
Fonte: autoria própria.

Figura 35 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40



Fonte: autoria própria.

Figura 36 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50

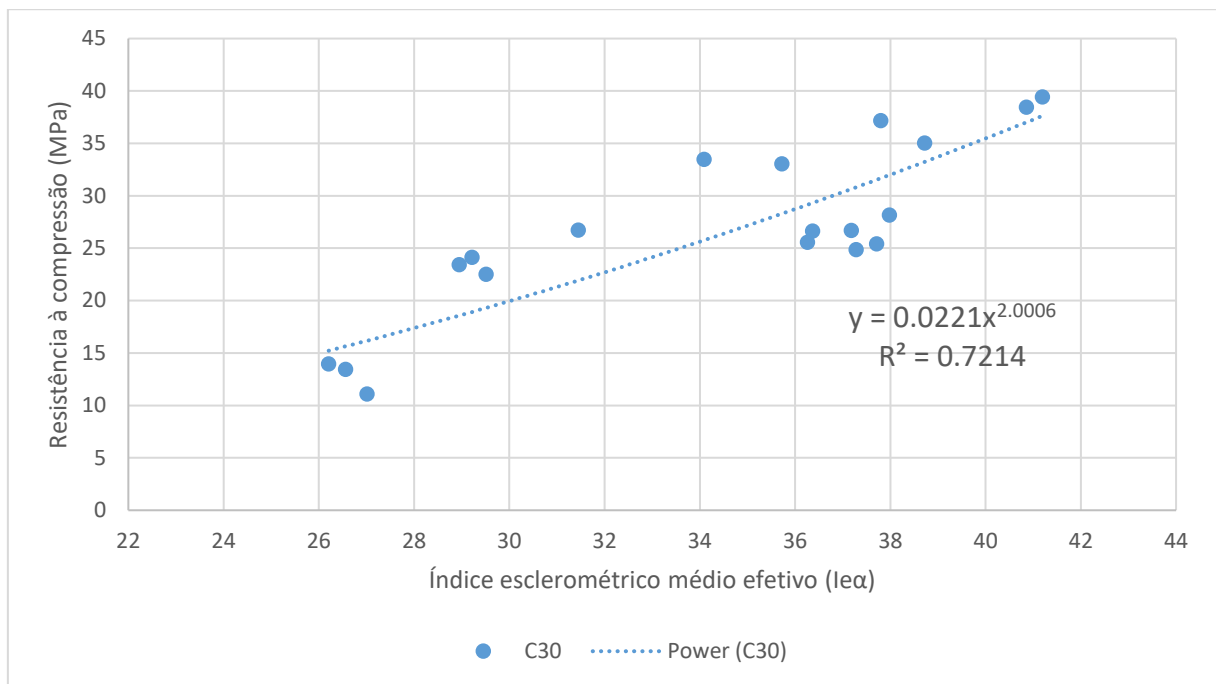


Fonte: autoria própria.

Os dados que apresentaram resíduo relativo (Re_r) maior ou igual à 20%, como também os dados visualmente distantes da curva, foram considerados suspeitos de serem “outliers”. Diante disso, foi realizada a avaliação individual de cada dado experimental, através da verificação do aumento ou diminuição do valor do r^2 , para decidir pela sua eliminação ou permanência.

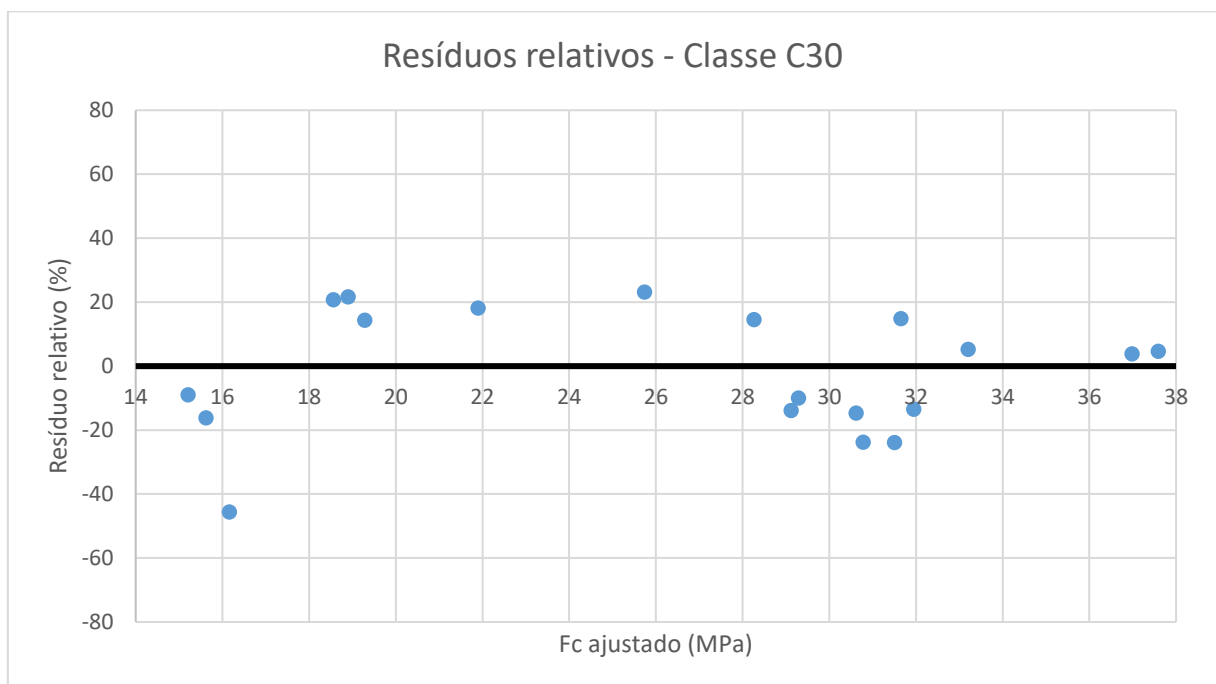
Após a eliminação dos “outliers”, as Figuras 37, 40 e 43 mostram as três novas curvas definidas para representar a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Nas Figuras 38, 41 e 44, estão representados os novos valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados para cada classe do concreto. As Figuras 39, 42 e 45 relacionam os valores de resistência à compressão medidos com os ajustados, quanto menor o ângulo formado entre a reta na cor preta com a reta de cor amarela, mais próximos são os valores medidos em relação aos ajustados, isto é, melhor a qualidade do ajuste.

Figura 37 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para a classe C30



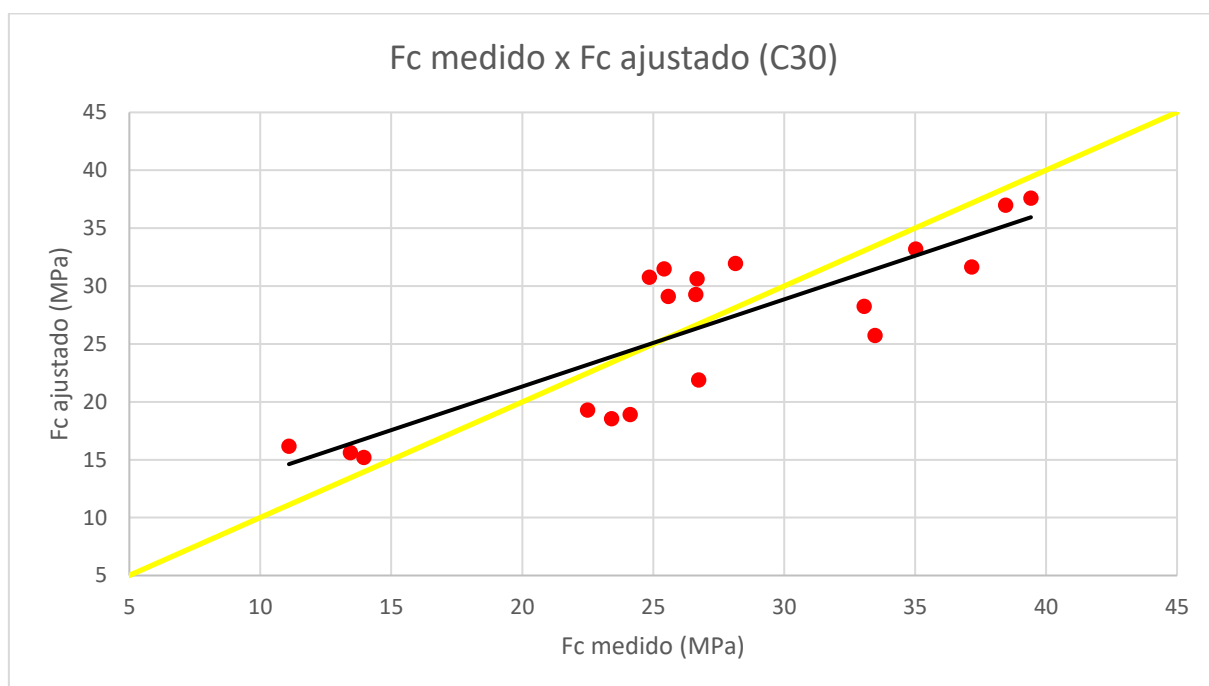
Fonte: autoria própria.

Figura 38 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30



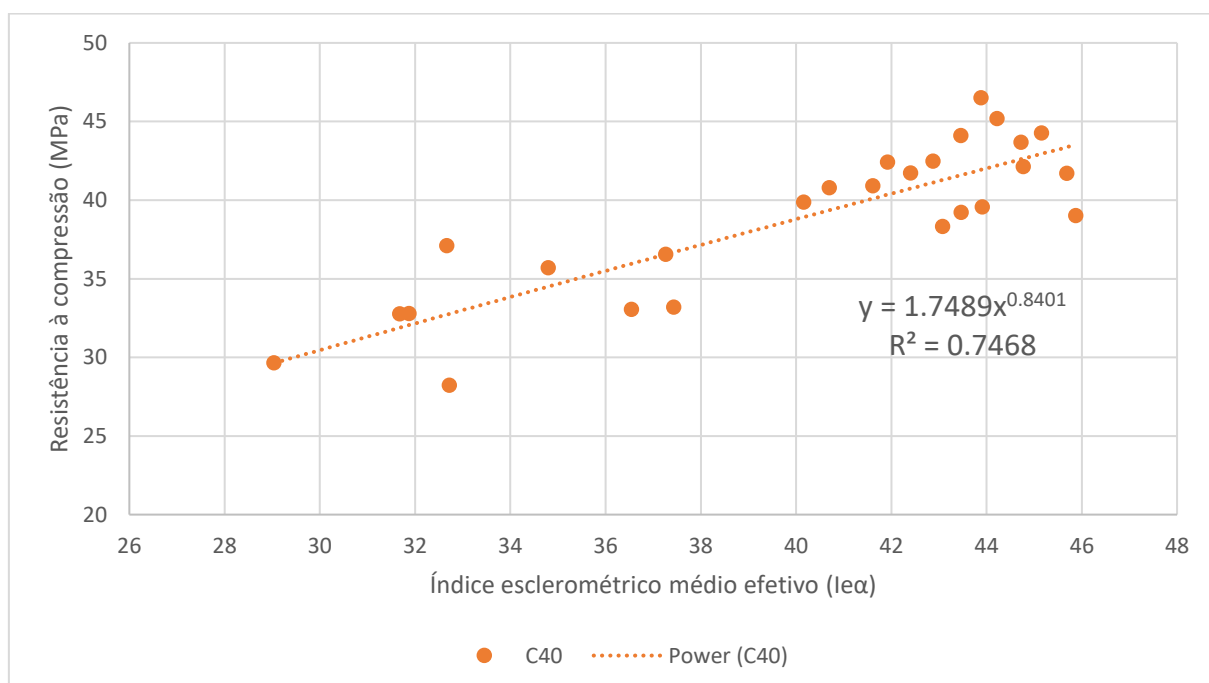
Fonte: autoria própria.

Figura 39 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C30)



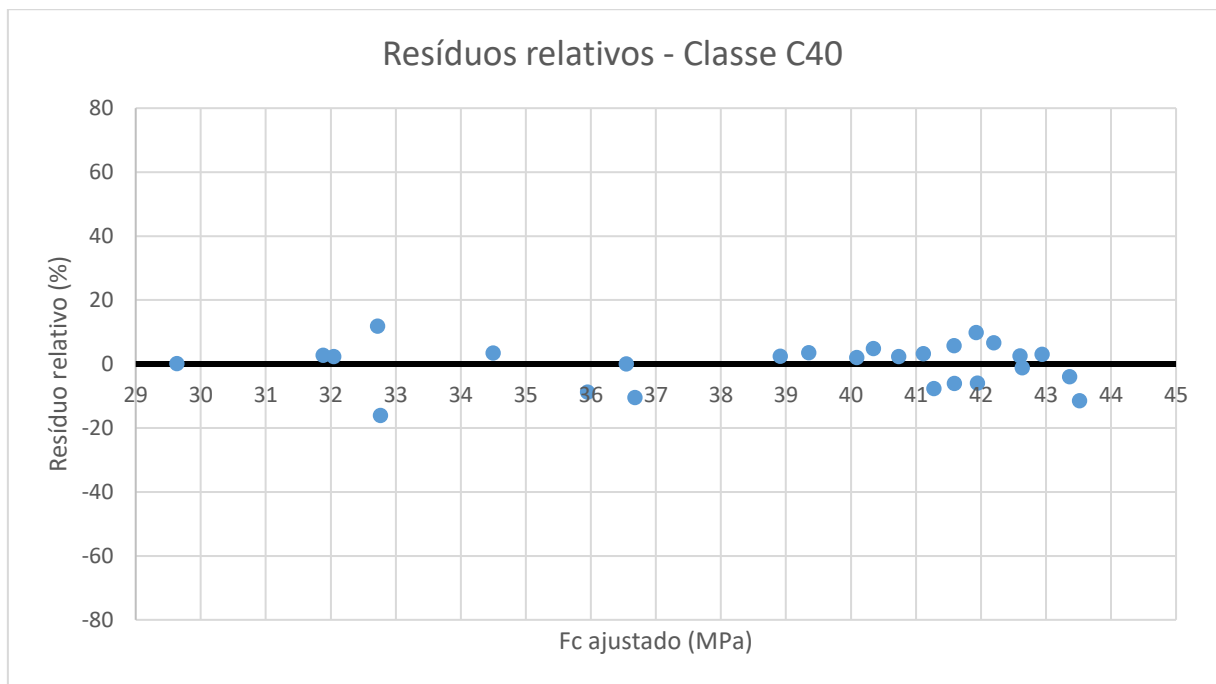
Fonte: autoria própria.

Figura 40 - Curva de correlação entre fc e IEα para a classe C40



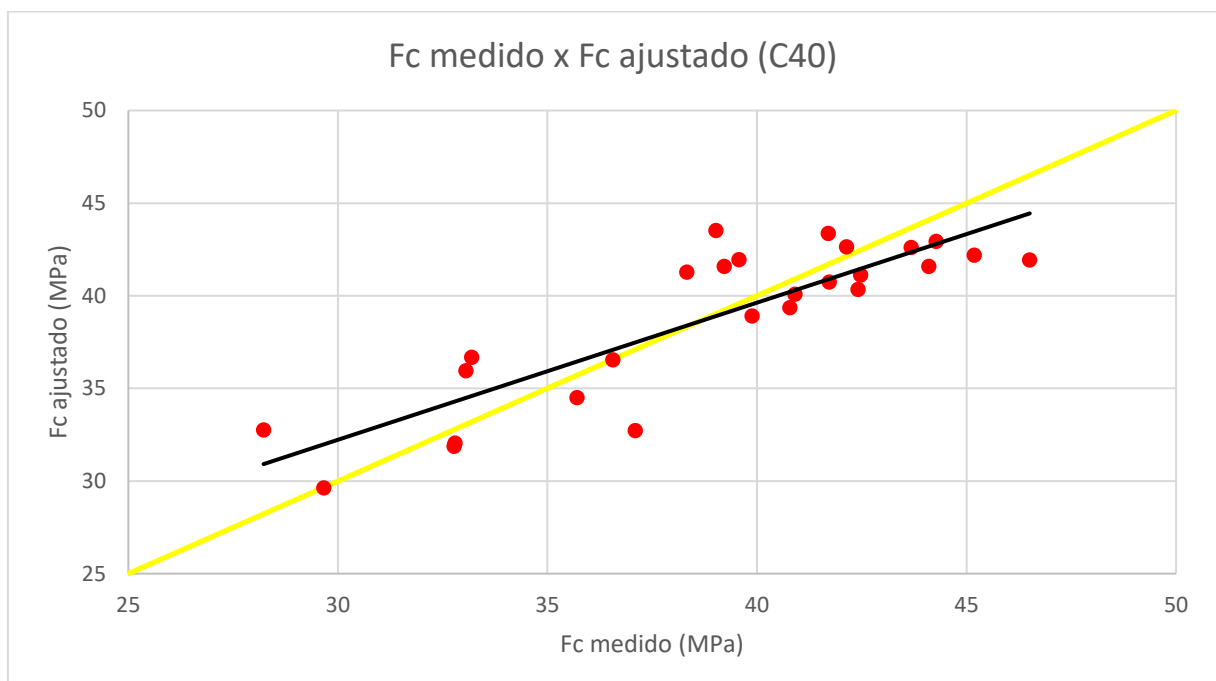
Fonte: autoria própria.

Figura 41 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40



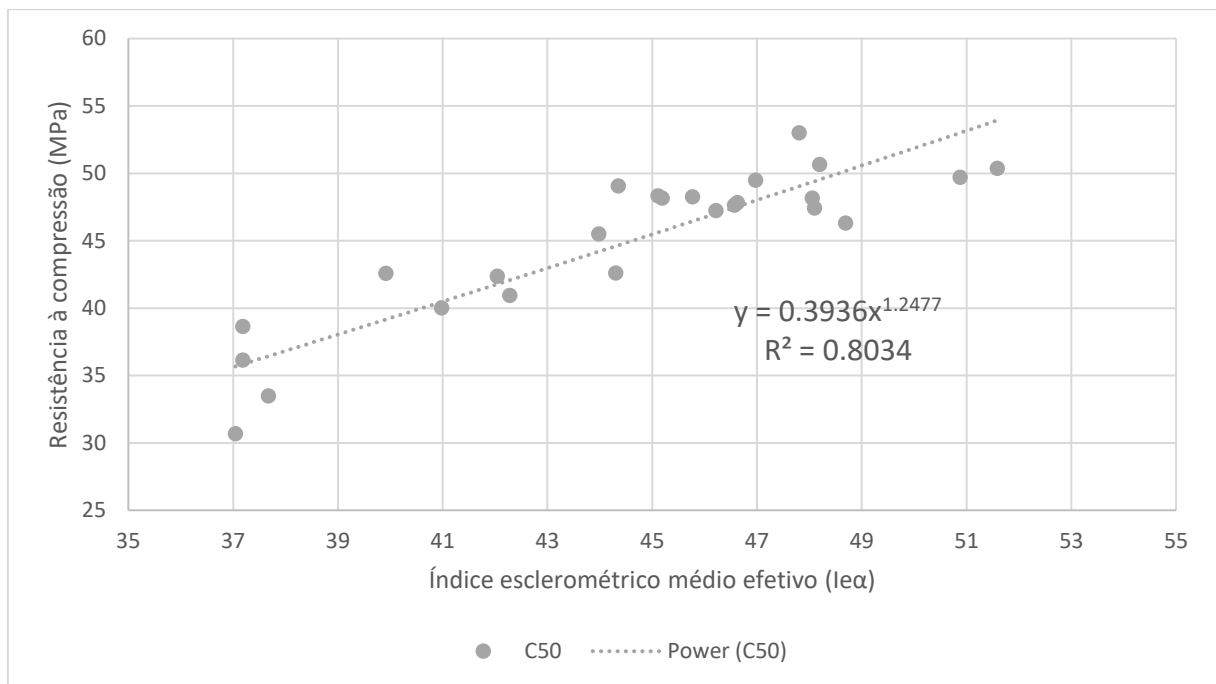
Fonte: autoria própria.

Figura 42 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C40)



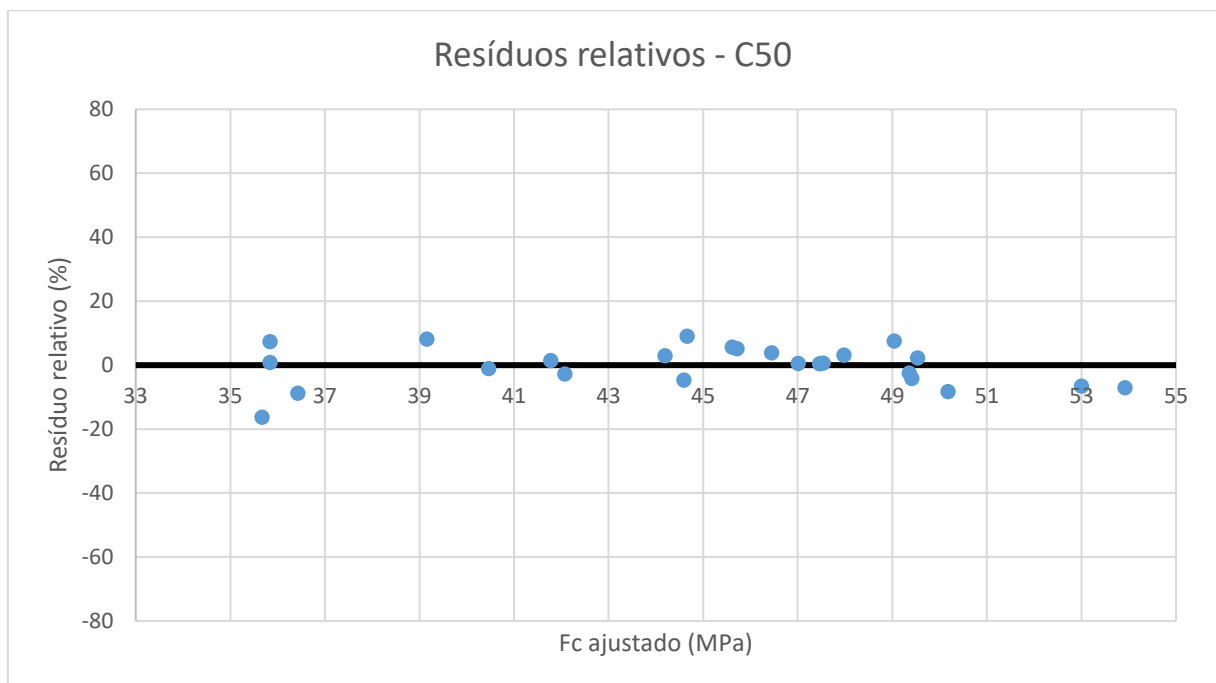
Fonte: autoria própria.

Figura 43 - Curva de correlação entre f_c e $IE\alpha$ para a classe C50



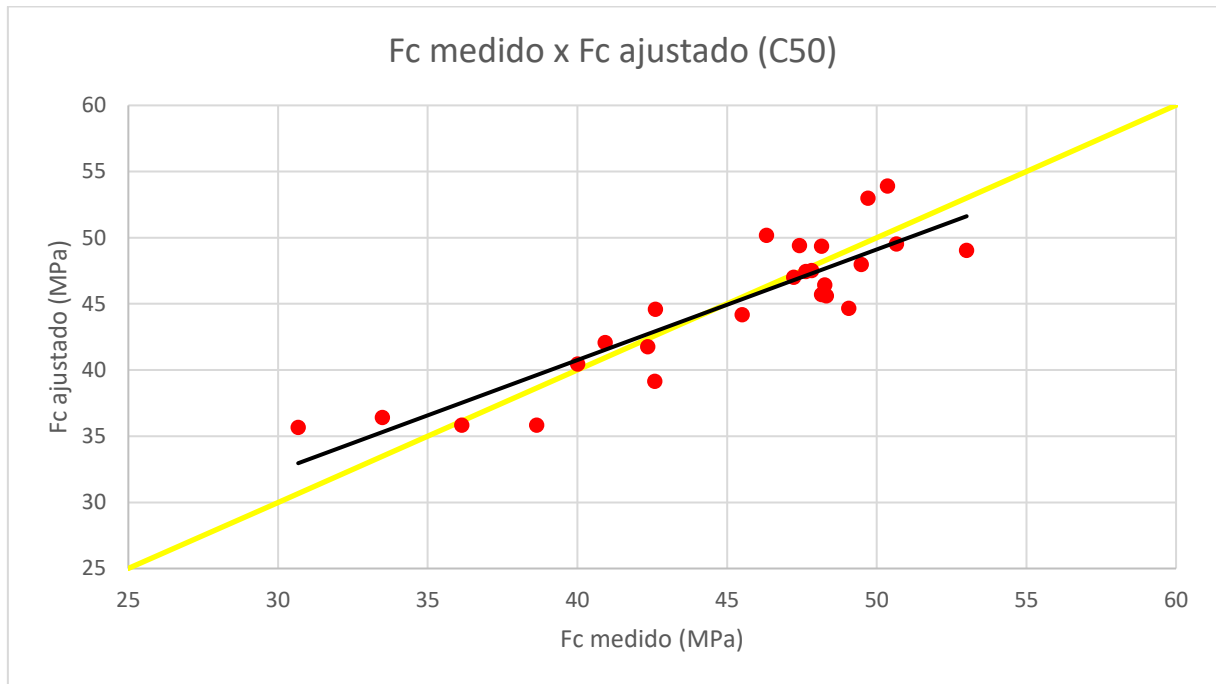
Fonte: autoria própria.

Figura 44 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50



Fonte: autoria própria.

Figura 45 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C50)



Fonte: autoria própria.

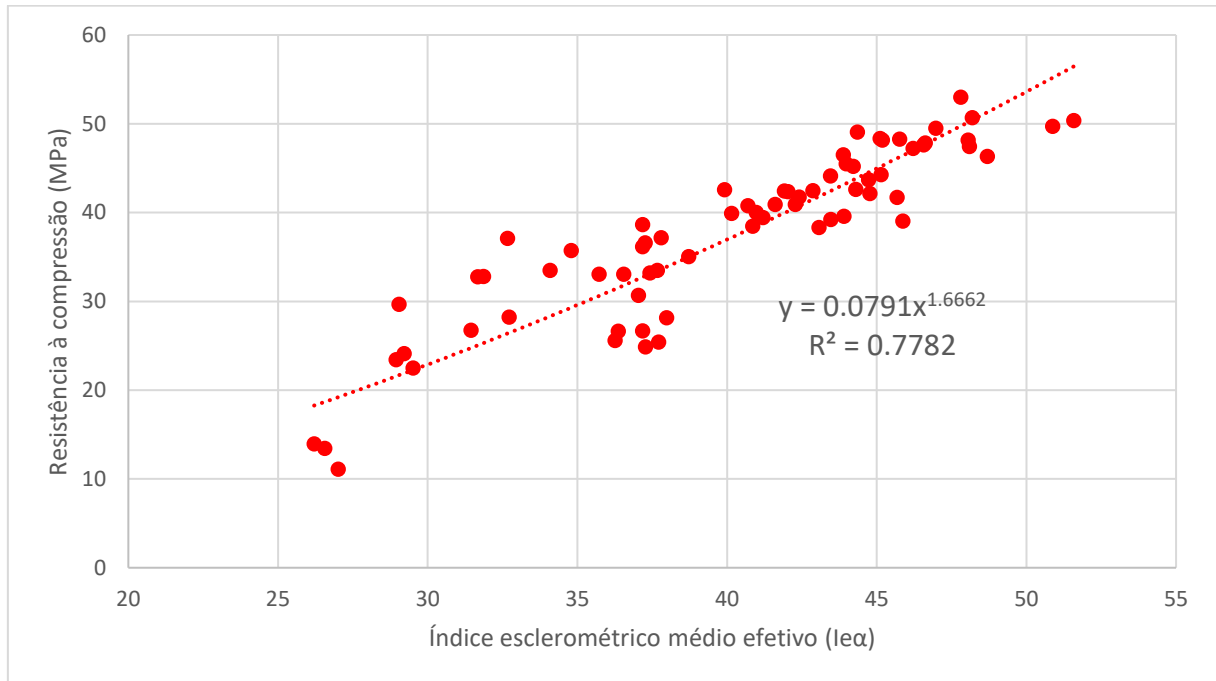
As Figuras 37, 40 e 43 evidenciam a melhora no ajustamento dos valores de resistência à compressão aos valores de índices esclerométricos médios efetivos, pois os coeficientes de determinação (r^2) aumentaram para todas as curvas de correlação, após a eliminação dos “outliers”. Para a classe C30, o r^2 passou de 0,1484 para 0,7214. Para a classe C40, o r^2 passou de 0,3902 para 0,7468. Para a classe C50, o r^2 passou de 0,6247 para 0,8034. Isto é, as curvas para as classes C30 e C40 apresentam um médio poder de explicação das correlações, enquanto que a curva para a classe C50 apresenta um alto poder de explicação da correlação.

É verificado pela análise das Figuras 38, 41 e 44 que somente alguns resíduos relativos da classe C30 estão acima de 20%. Os dados experimentais, que geraram esses resíduos, não foram eliminados para não prejudicar a respectiva curva de correlação. As Figuras 39, 42 e 45 permitem avaliar que todas as curvas apresentam bons ajustes.

Após esta etapa, os dados experimentais remanescentes foram reunidos em um único conjunto para a determinar uma curva geral para as três classes de concreto. A Figura 46 mostra a curva geral para representar a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Na Figura 47,

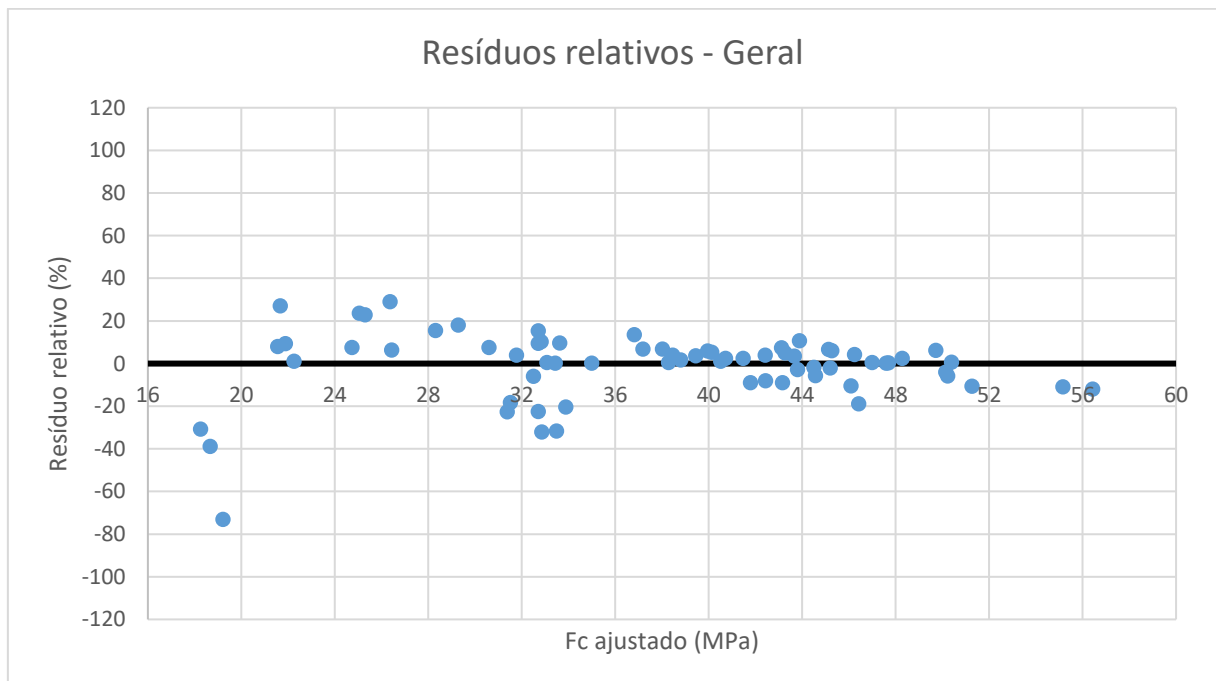
estão representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados para o conjunto das classes.

Figura 46 - Curva de correlação geral entre f_c e $IE\alpha$



Fonte: autoria própria.

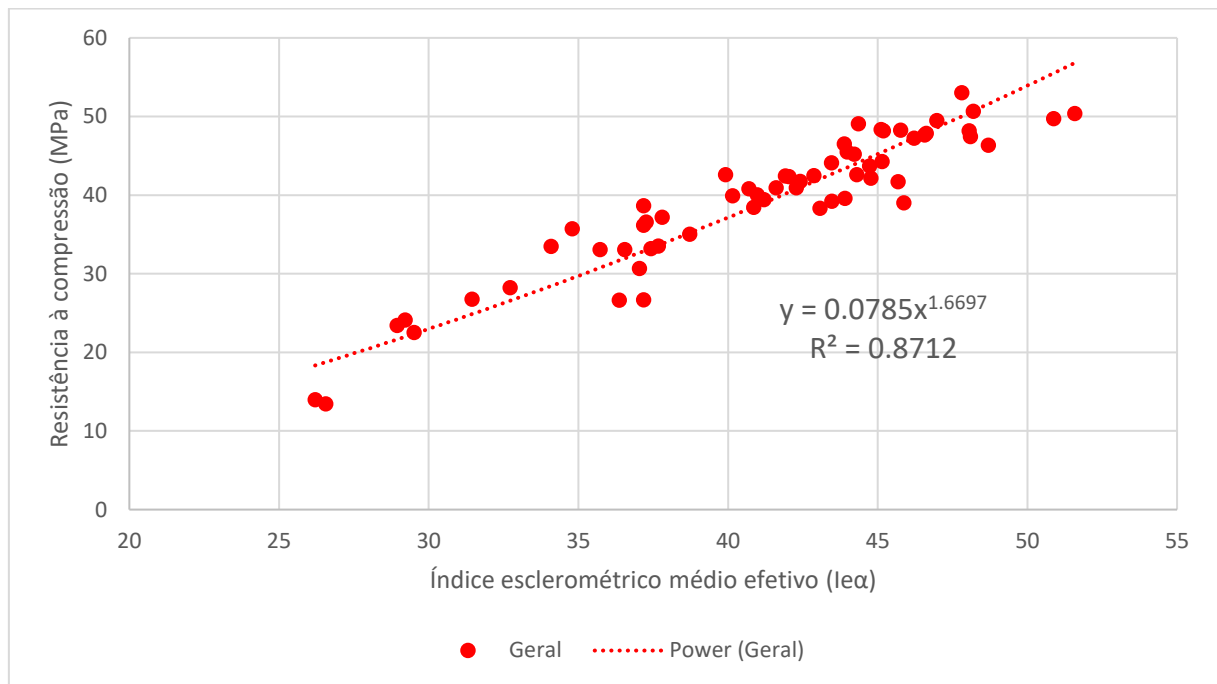
Figura 47 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ (Geral)



Fonte: autoria própria.

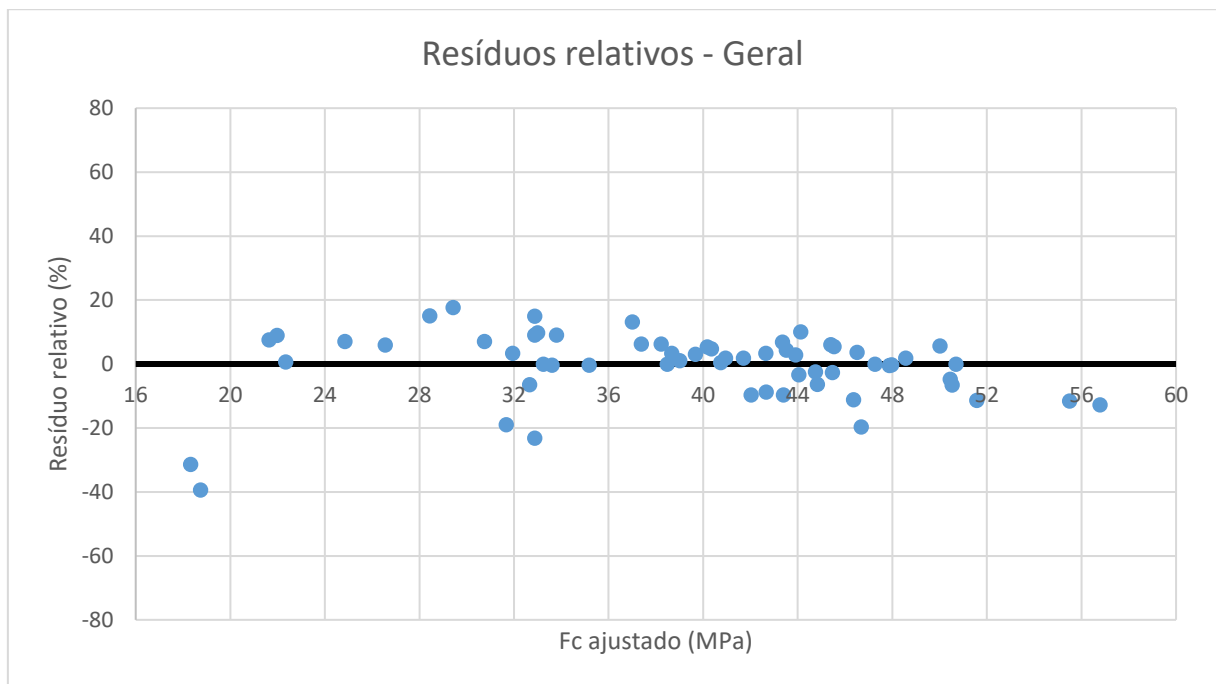
Com o intuito de melhorar o ajuste, um novo tratamento estatístico com eliminação de “outliers” foi realizado. Após essa eliminação, a Figura 48 mostra a nova curva geral que representa a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Na Figura 49, estão representados os novos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados. A Figura 50 relaciona os valores de resistência à compressão medidos com os ajustados.

Figura 48 - Curva de correlação geral entre f_c e $IE\alpha$



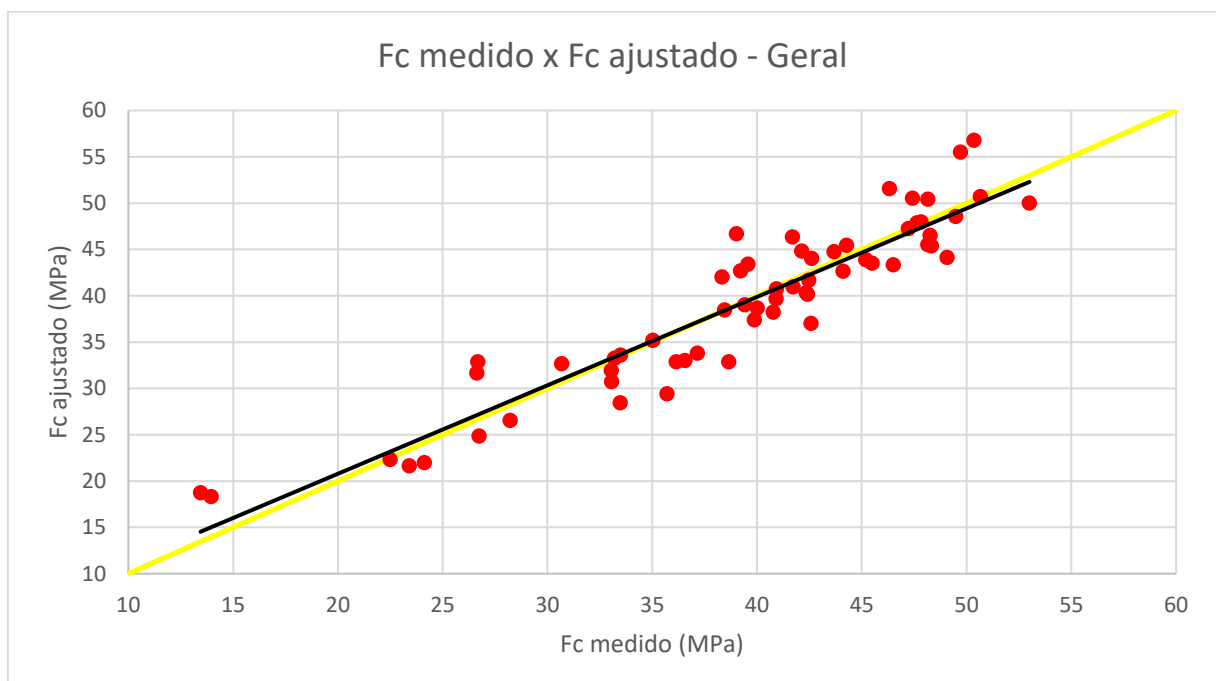
Fonte: autoria própria.

Figura 49 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e $IE\alpha$ (Geral)



Fonte: autoria própria.

Figura 50 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Geral)



Fonte: autoria própria.

A Tabela 12 compara os valores dos coeficientes de determinação (r^2) de todas as curvas de correlações geradas.

Tabela 12 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação (f_c x $IE\alpha$)

Identificação da curva	Coeficiente de determinação (r^2)
C30	0,7214
C40	0,7468
C50	0,8034
Geral	0,8712*
* R^2 após segundo tratamento estatístico de dados.	

Fonte: autoria própria.

A Tabela 12 evidencia que o conjunto geral, formado por todos os valores de resistência à compressão (f_c) e índices esclerométricos médios efetivos ($IE\alpha$), após a realização de um segundo tratamento de dados, apresenta o maior r^2 , no valor de 0,8712, apontando um alto poder de explicação para a correlação. Diante disso, é conveniente utilizar somente a curva de correlação geral (Equação 11) para a estimativa da resistência à compressão por meio de medidas obtidas pelo ensaio de esclerometria.

$$\text{Geral:} \quad f_c = 0,0785 \cdot IE\alpha^{1,6697} \quad (11)$$

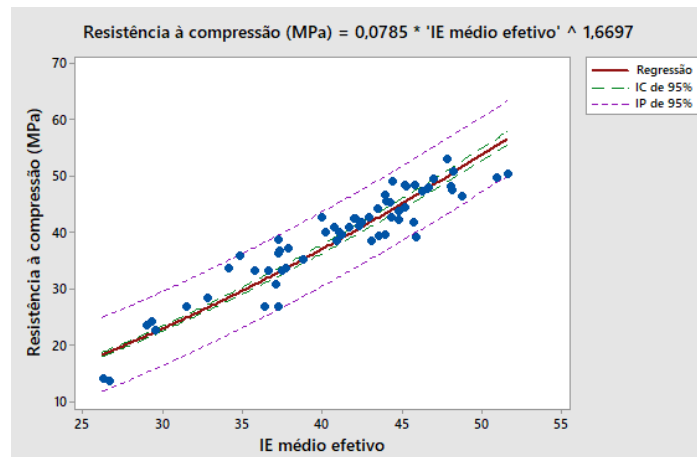
onde:

f_c = resistência à compressão em MPa;

$IE\alpha$ = índice esclerométrico médio efetivo que varia entre 25 a 55.

Com o auxílio do programa Minitab 18, foi construída, automaticamente, a curva de correlação geral, juntamente com seus intervalos de confiança de 95% e de predição de 95% (Figura 51).

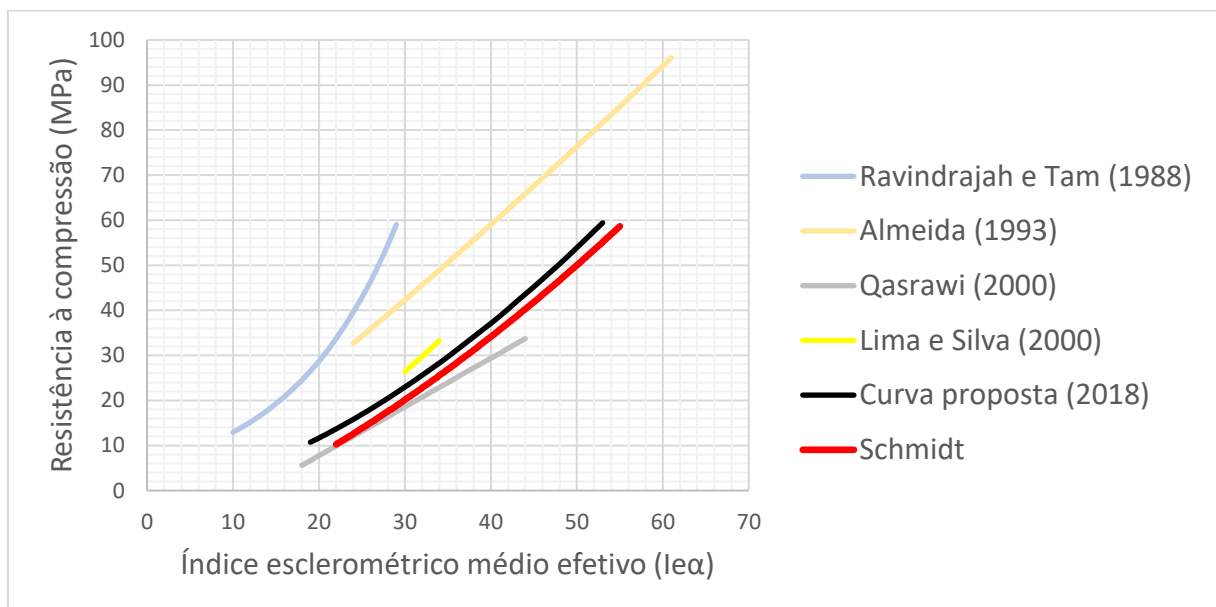
Figura 51 - Curva de correlação geral entre f_c e $IE\alpha$



Fonte: autoria própria.

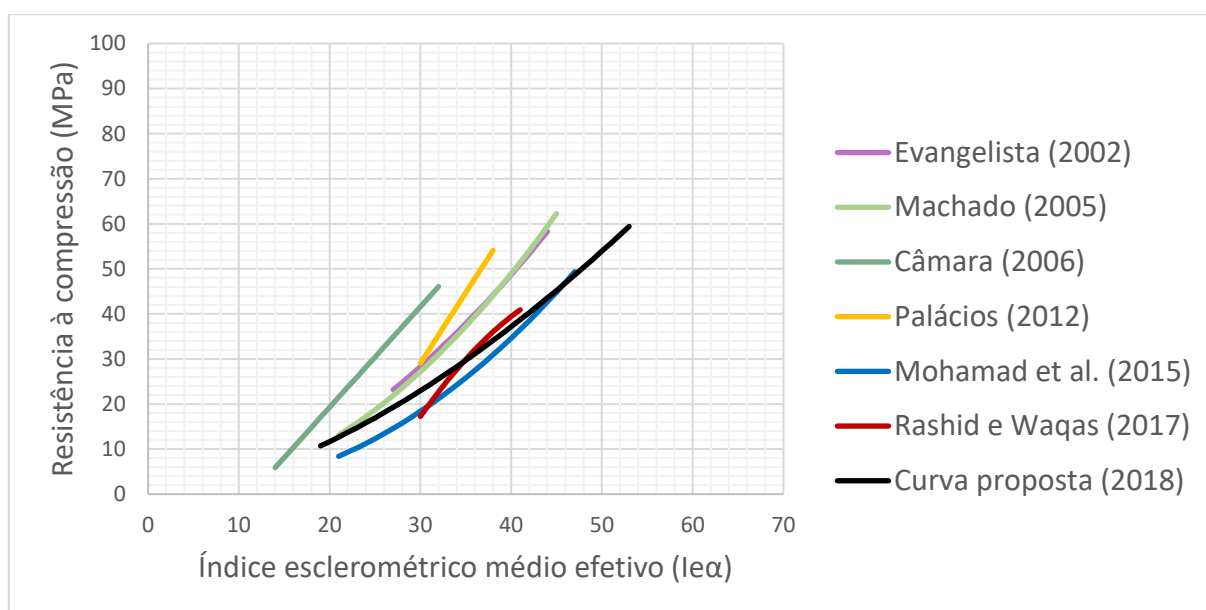
Uma comparação entre as curvas propostas por diversos autores e a proposta neste trabalho são apresentadas na Figuras 52 e 53. Vale ressaltar, que as curvas que foram elaboradas utilizando corpos de prova cúbicos tiveram seus valores de resistência à compressão multiplicados por 0,8 (NEVILLE, 2016), para serem equivalentes aos valores obtidos nesta pesquisa.

Figura 52 - Comparação entre as curvas (f_c versus $IE\alpha$)



Fonte: autoria própria.

Figura 53 - Comparação entre as curvas (f_c versus $IE\alpha$)



Fonte: autoria própria.

As Figuras 52 e 53 demonstram a existência de variação entre as curvas propostas por diversos autores e a proposta neste trabalho. Contudo, algumas são próximas entre si, a exemplo das curvas dos seguintes autores: Lima e Silva (2000), Qasrawi (2000), Schmidt, Mohamad *et al.* (2015), Rashid e Waqas (2017) e a curva proposta.

Também é analisado que a curva encontrada no próprio esclerômetro de Schmidt Tipo N possui curvatura e crescimento bastante semelhante à curva encontrada nesta pesquisa, o que difere uma da outra, é que a última leva a valores estimados ligeiramente mais altos com o mesmo valor de índice esclerométrico médio efetivo.

Essas comparações confirmam a previsão de variação entre as curvas, acarretada pelas mudanças nos materiais componentes. Além disso, é possível inferir que a depender da curva, essa variação não é significativa ao confrontá-la com a curva fornecida pelo aparelho.

Diante disso, a utilização da curva de Schmidt, para a estimativa da resistência à compressão de concretos, é válida para alguns casos. Todavia, para fornecer uma avaliação mais confiável de determinado concreto, recomenda-se a utilização de curvas de correlação próprias.

4.4.2. Resistência à compressão x Resistividade elétrica superficial (f_c x RES)

Nos estudos de regressão não linear simples, visando a escolha da curva que melhor representasse a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e resistividade elétrica superficial (RES), foram testados quatro modelos de correlação para cada classe de concreto (C30/C40/C50). No Quadro 9, estão dispostos os resultados de r^2 obtidos para cada uma das curvas.

Quadro 9 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão (f_c) e resistividade elétrica superficial (RES)

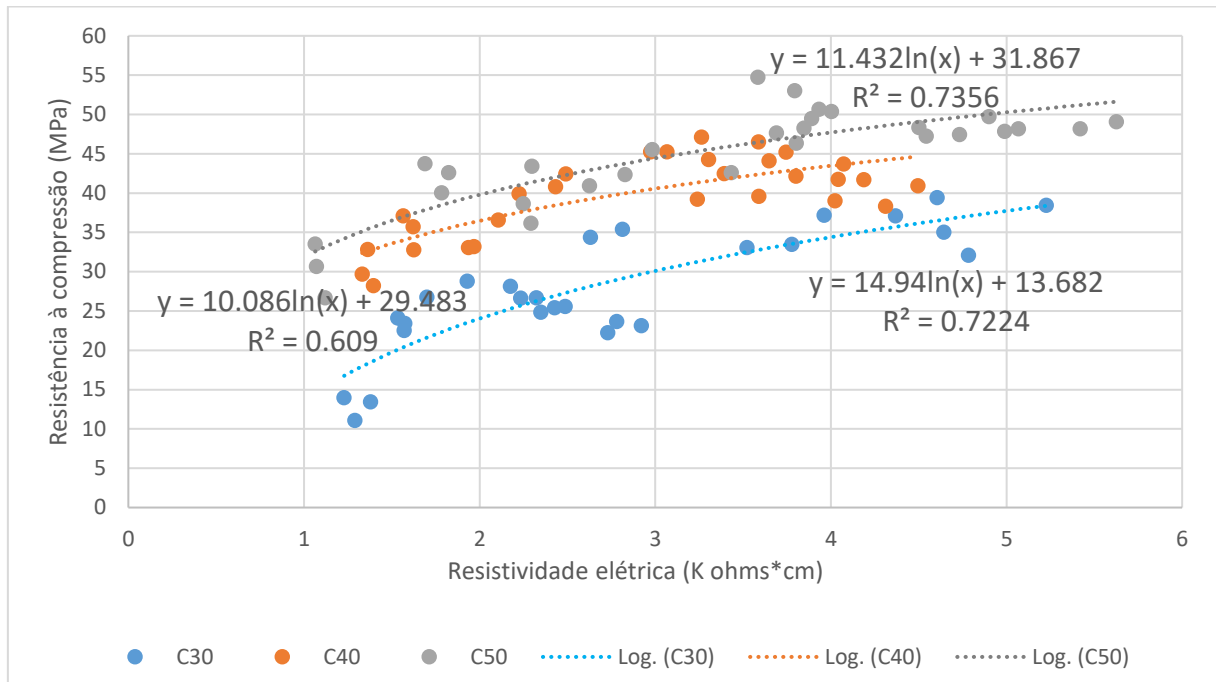
Tipo de curva	r^2		
	C30	C40	C50
Exponencial	0,5753	0,5312	0,6147
Linear	0,6682	0,5155	0,6286
Logarítmica	0,7224	0,609	0,7356
Potência	0,6661	0,6274	0,7366

Fonte: autoria própria.

A curva de correlação que melhor se ajusta aos dados experimentais foi a gerada pela função logarítmica. De acordo com revisão da literatura deste trabalho, constata-se que a curva mais indicada por diversos autores para representar a relação f_c versus RES também foi a função logarítmica.

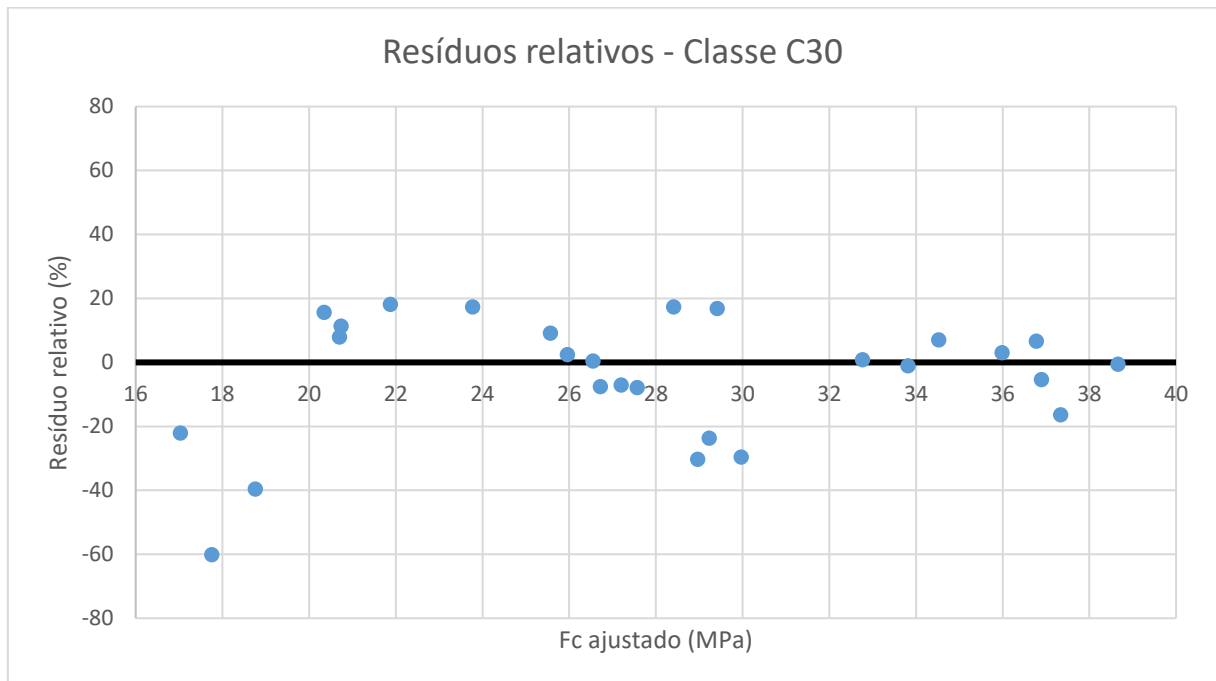
A Figura 54 mostra as três curvas escolhidas para representar a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e a resistividade elétrica superficial (RES). Nas Figuras 55, 56 e 57, são representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados para cada classe do concreto.

Figura 54 - Curva de correlação entre f_c e RES para cada classe do concreto



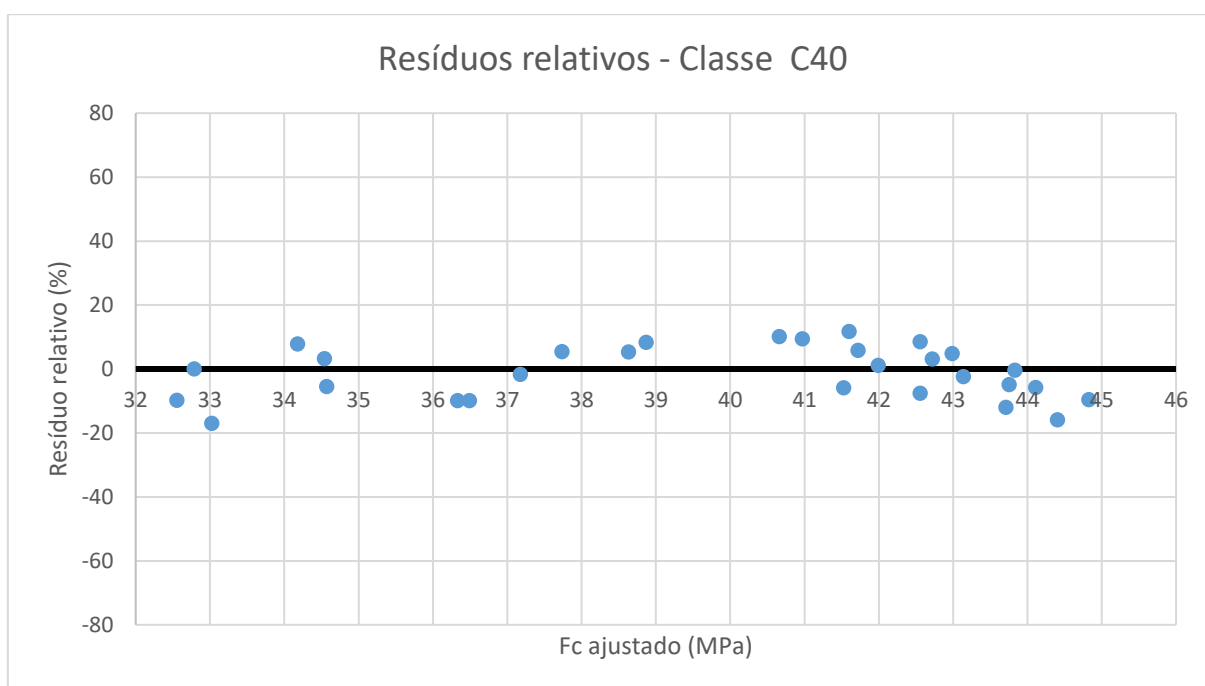
Fonte: autoria própria.

Figura 55 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C30



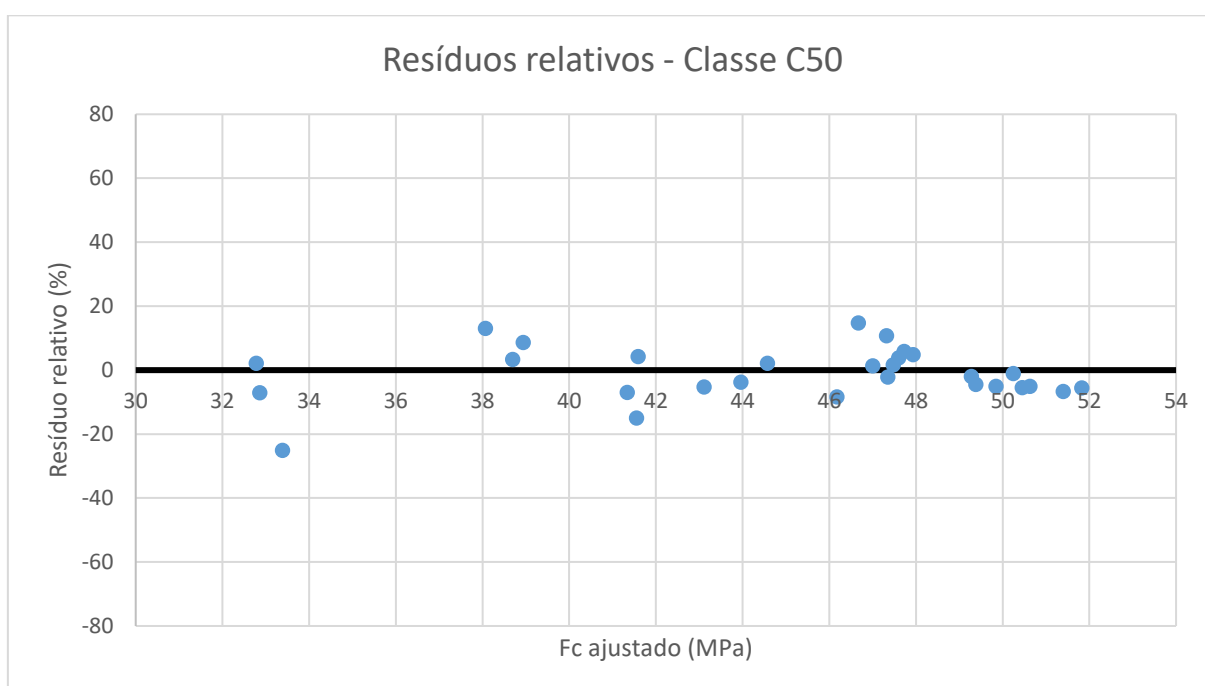
Fonte: autoria própria.

Figura 56 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C40



Fonte: autoria própria.

Figura 57 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C50



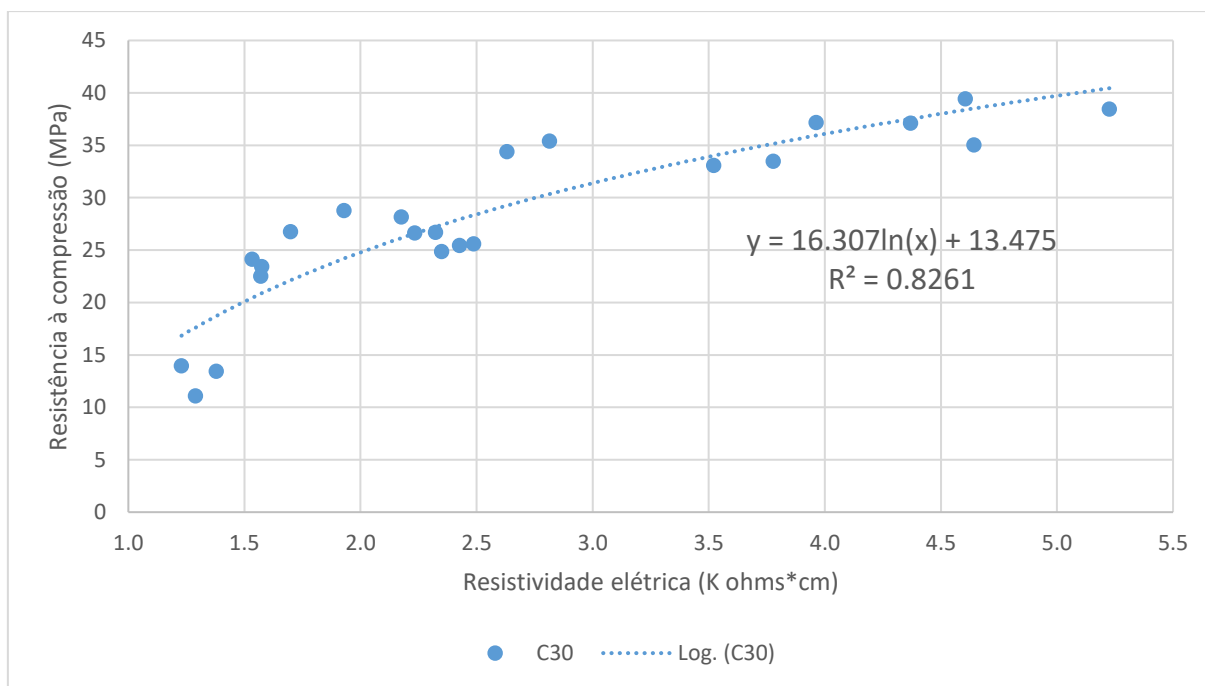
Fonte: autoria própria.

Os dados que apresentaram resíduo relativo (Re_r) maior ou igual à 20%, como também os dados visualmente distantes da curva, foram considerados suspeitos de serem “outliers”. Diante disso, foi realizada a avaliação individual de cada dado experimental,

através da verificação do aumento ou diminuição do valor do r^2 , para decidir pela sua eliminação ou permanência.

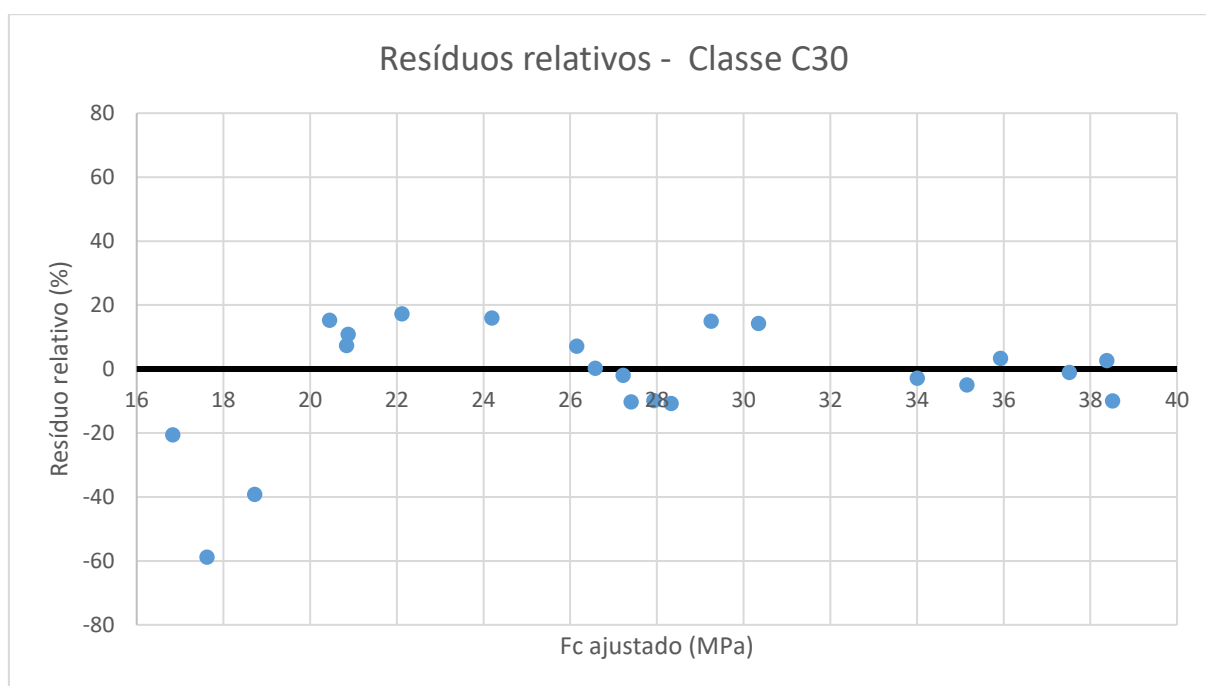
Após a eliminação dos “outliers”, as Figuras 58, 61 e 64 mostram as três novas curvas definidas para representar a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e o resistividade elétrica superficial (RES). Nas Figuras 59, 62 e 65, estão representados os novos valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados para cada classe do concreto. As Figuras 60, 63 e 66 relacionam os valores de resistência à compressão medidos com os ajustados, quanto menor o ângulo formado entre a reta na cor preta com a reta de cor amarela, mais próximos são os valores medidos em relação aos ajustados, isto é, melhor a qualidade do ajuste.

Figura 58 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C30



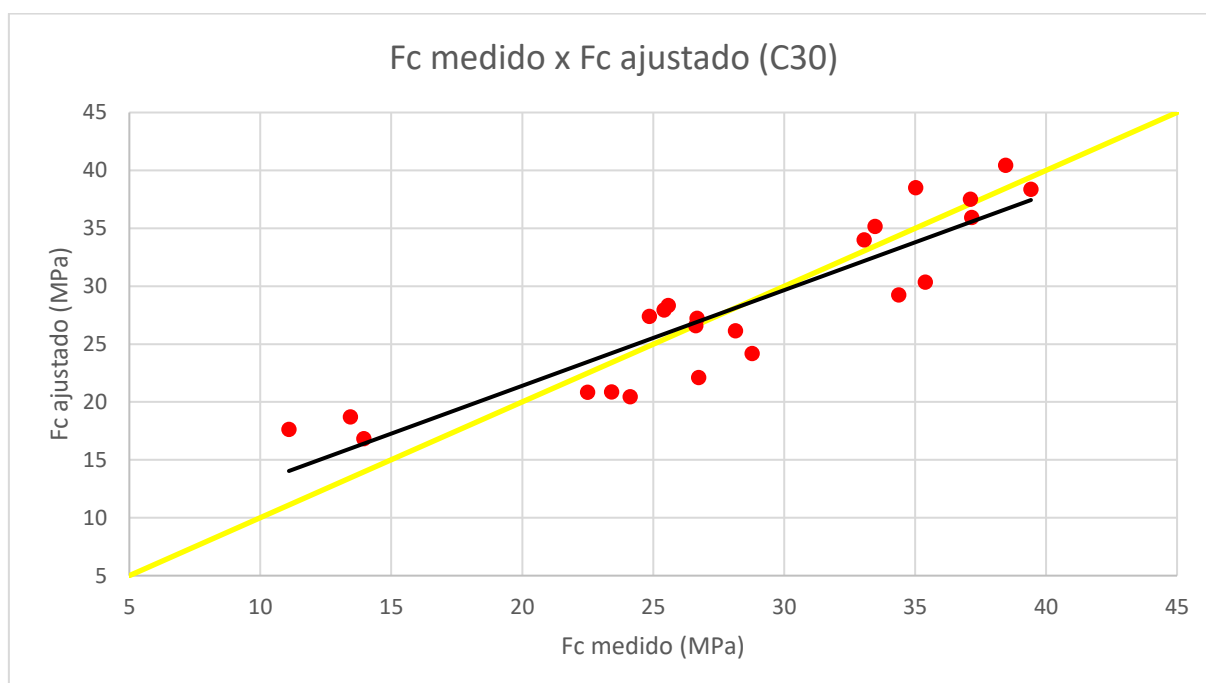
Fonte: autoria própria.

Figura 59 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C30



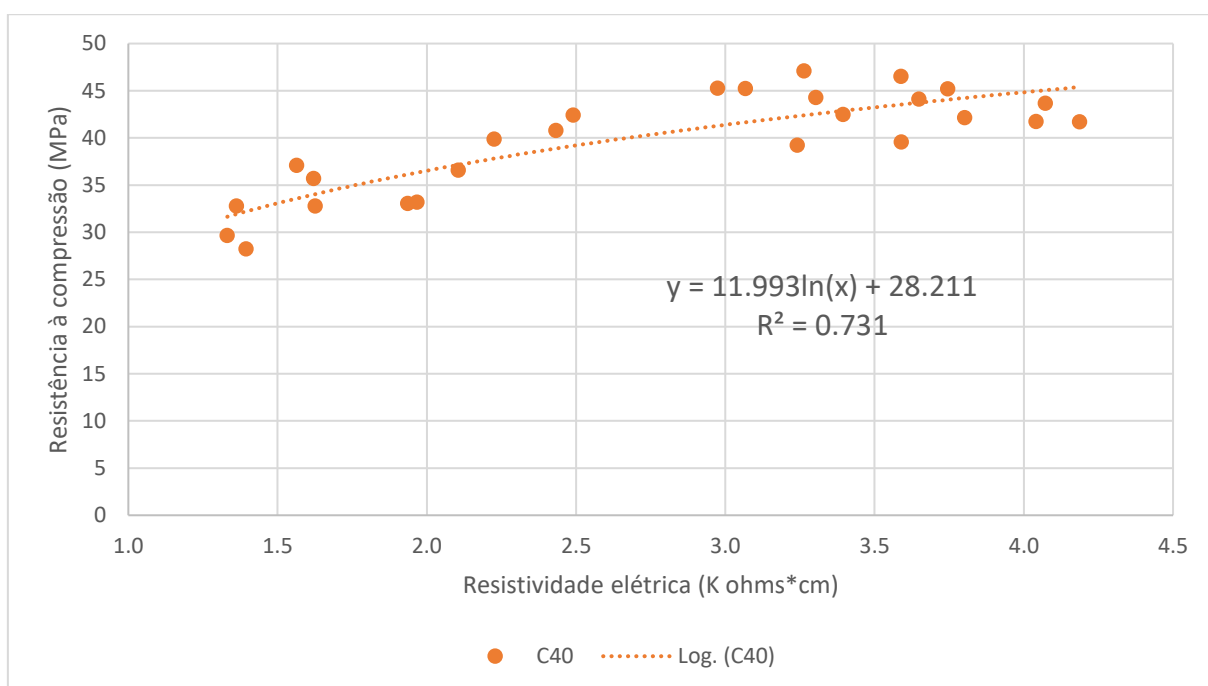
Fonte: autoria própria.

Figura 60 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C30)



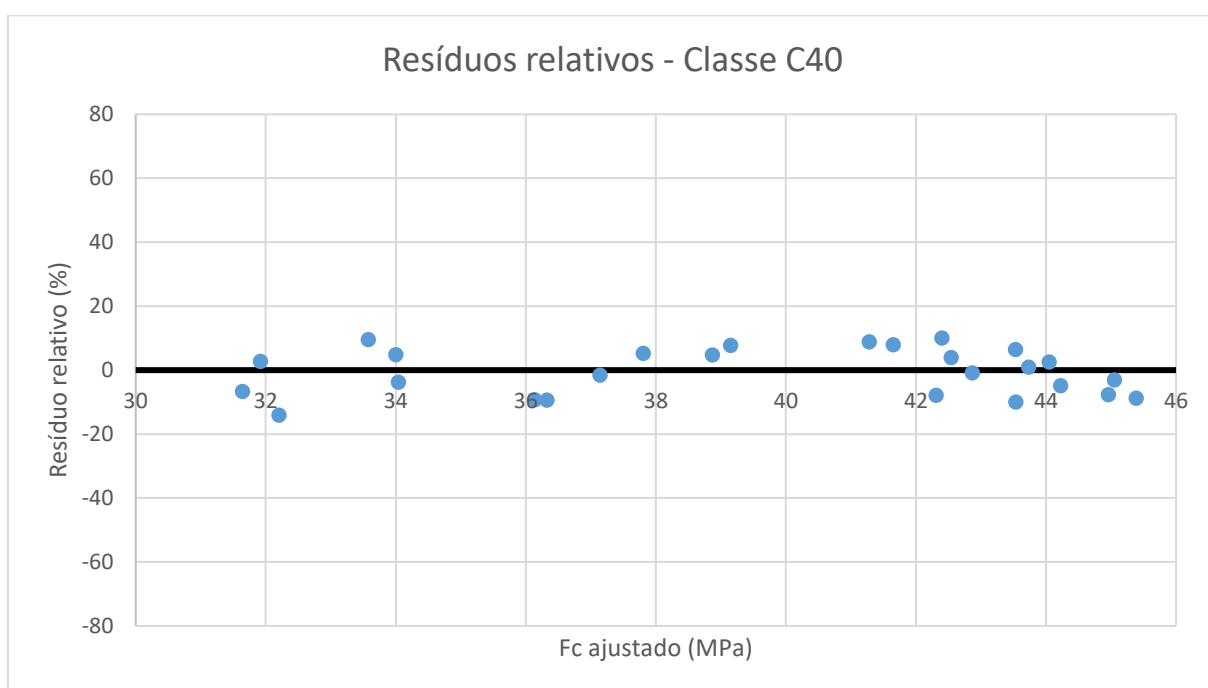
Fonte: autoria própria.

Figura 61 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C40



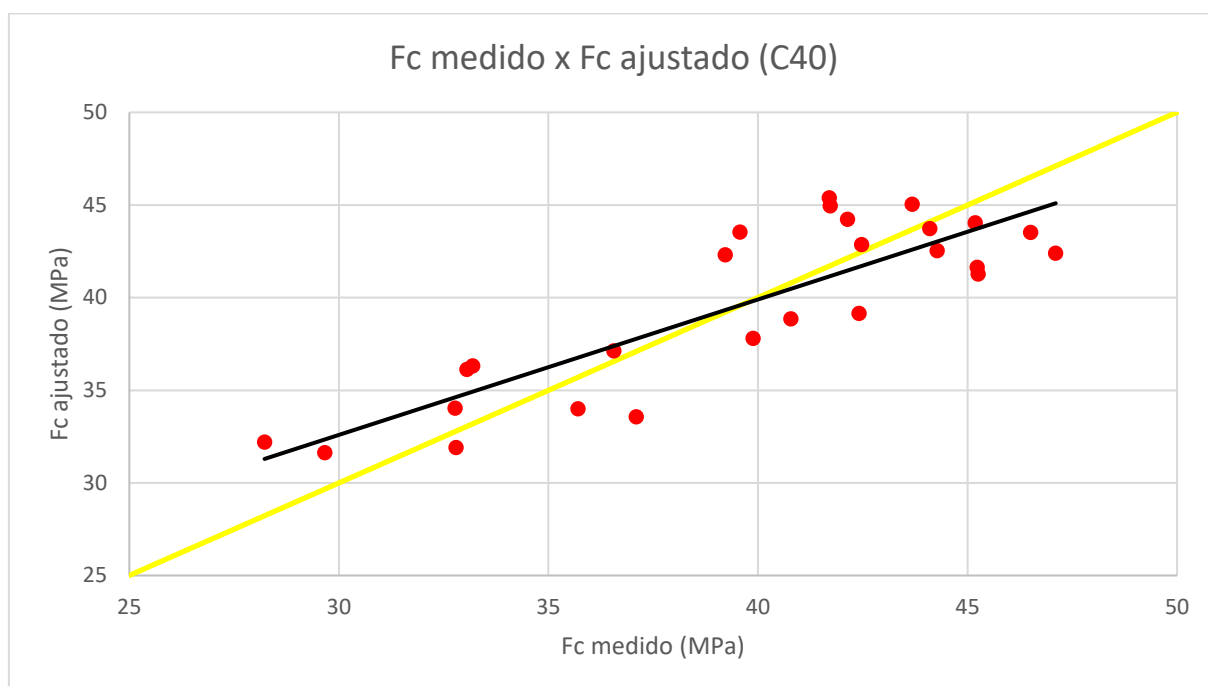
Fonte: autoria própria.

Figura 62 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C40



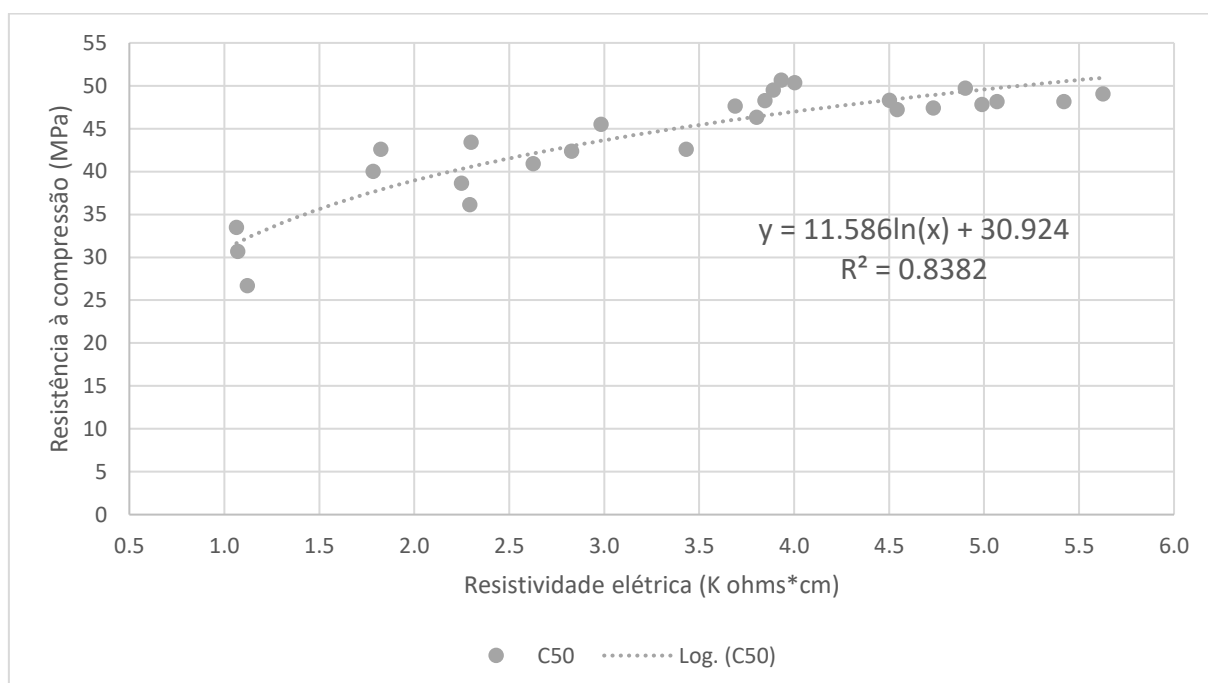
Fonte: autoria própria.

Figura 63 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C40)



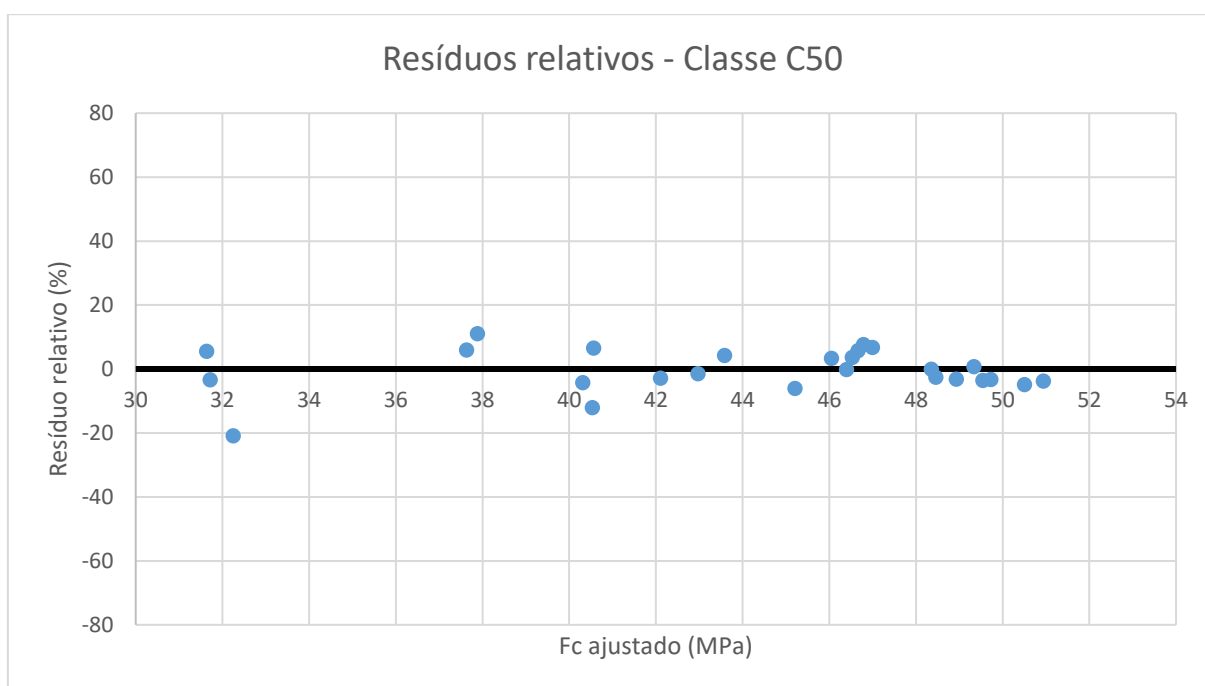
Fonte: autoria própria.

Figura 64 - Curva de correlação entre fc e RES para a classe C50



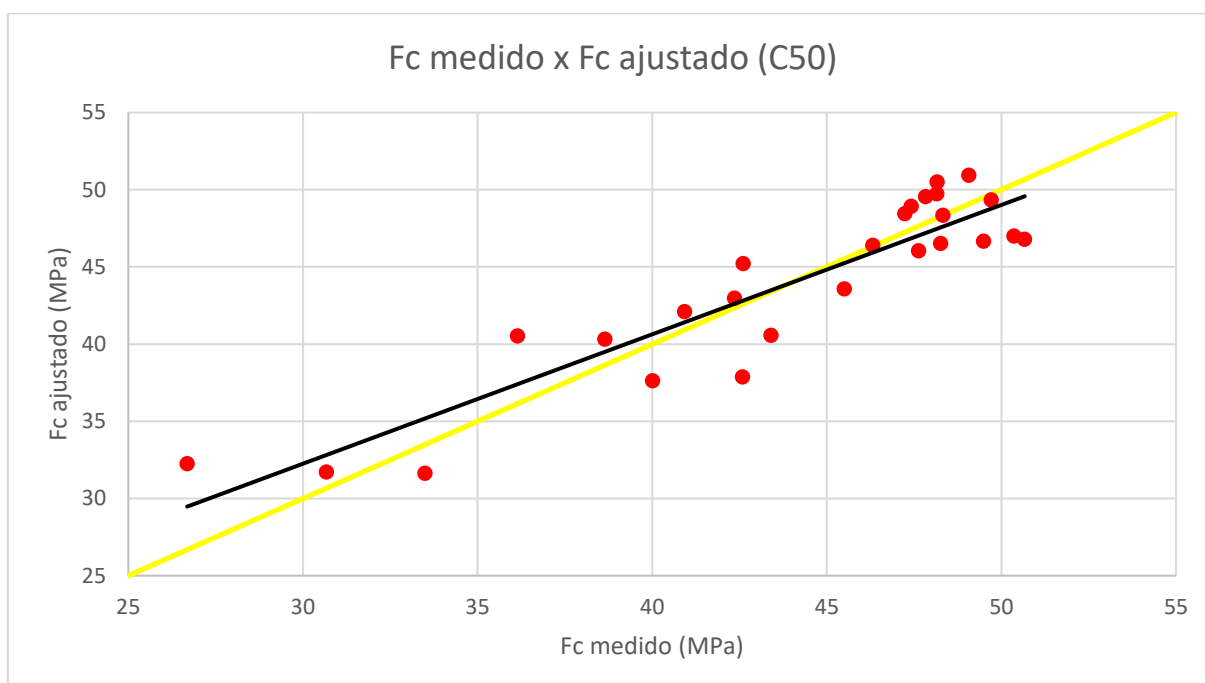
Fonte: autoria própria.

Figura 65 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES para a classe C50



Fonte: autoria própria.

Figura 66 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Classe C50)



Fonte: autoria própria.

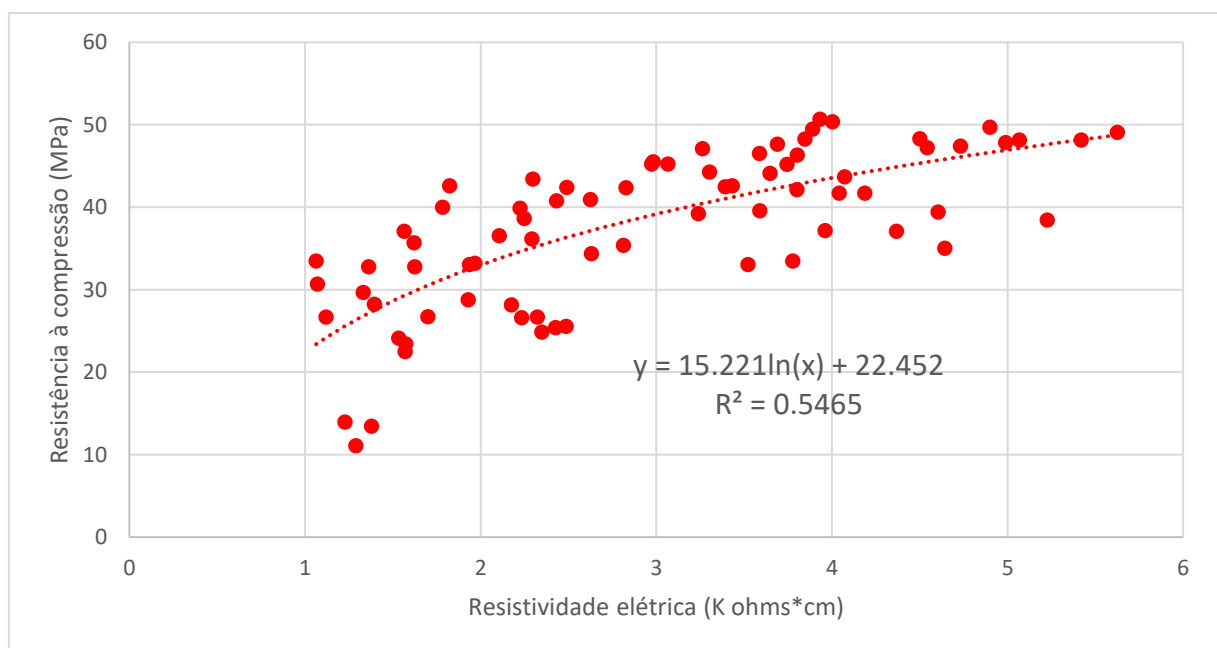
As Figuras 58, 61 e 64 evidenciam a melhora no ajustamento dos valores de resistência à compressão às medidas de resistividade elétrica. Os coeficientes de

determinação (r^2) iniciais já eram considerados bons, contudo, após a eliminação de alguns “outliers”, os r^2 aumentaram ainda mais para todas as curvas de correlação. Para a classe C30, o r^2 passou de 0,7224 para 0,8261. Para a classe C40, o r^2 passou de 0,609 para 0,731. Para a classe C50, o r^2 passou de 0,7356 para 0,8382. Isto é, a curva para a classe C30 apresenta um médio poder de explicação para a correlação, enquanto que as curvas para as classes C40 e C50 apresentam um alto poder de explicação para as correlações.

É verificado, pela análise das Figuras 59, 62 e 65, que somente alguns resíduos relativos da classe C30 e C50 estão acima de 20%. Os dados experimentais, que geraram esses resíduos, não foram eliminados para não prejudicar a respectiva curva de correlação. As Figuras 60, 63 e 66 permitem avaliar que todas as curvas apresentam bons ajustes.

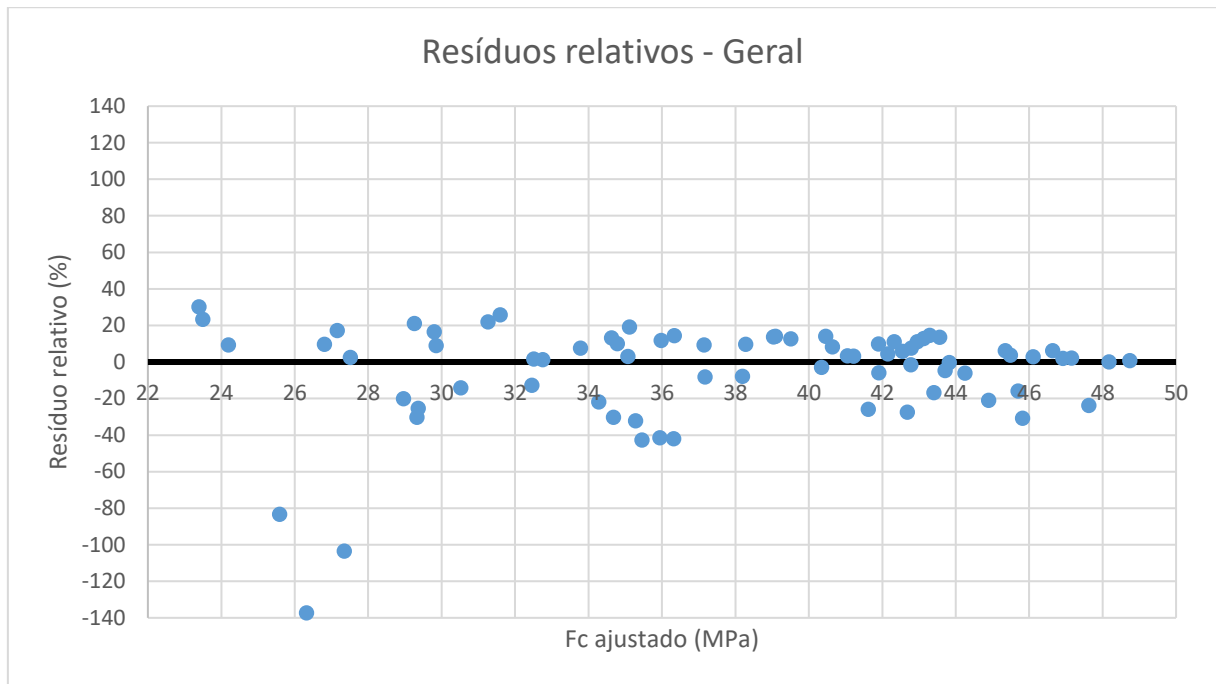
Após esta etapa, os dados experimentais remanescentes foram reunidos em um único conjunto para determinar uma curva geral para as três classes de concreto. A Figura 67 mostra a curva geral para representar a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e a resistividade elétrica superficial (RES). Na Figura 68, estão representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados para o conjunto das classes.

Figura 67 - Curva de correlação geral entre f_c e RES



Fonte: autoria própria.

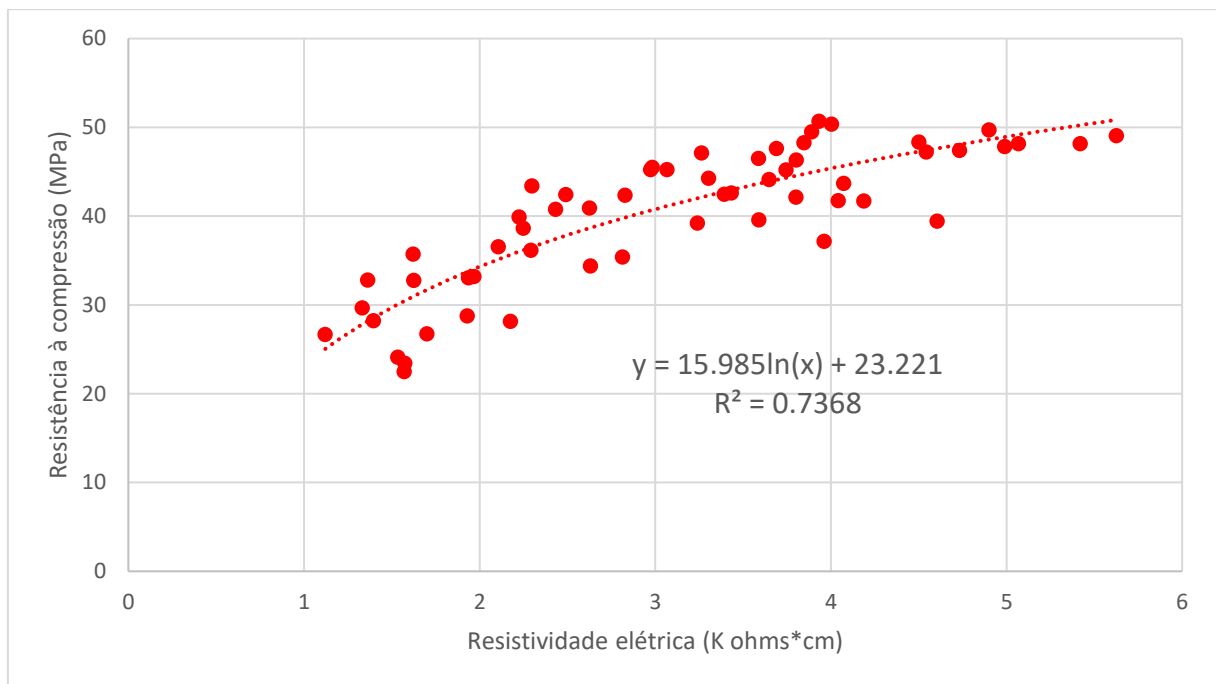
Figura 68 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES (Geral)



Fonte: autoria própria.

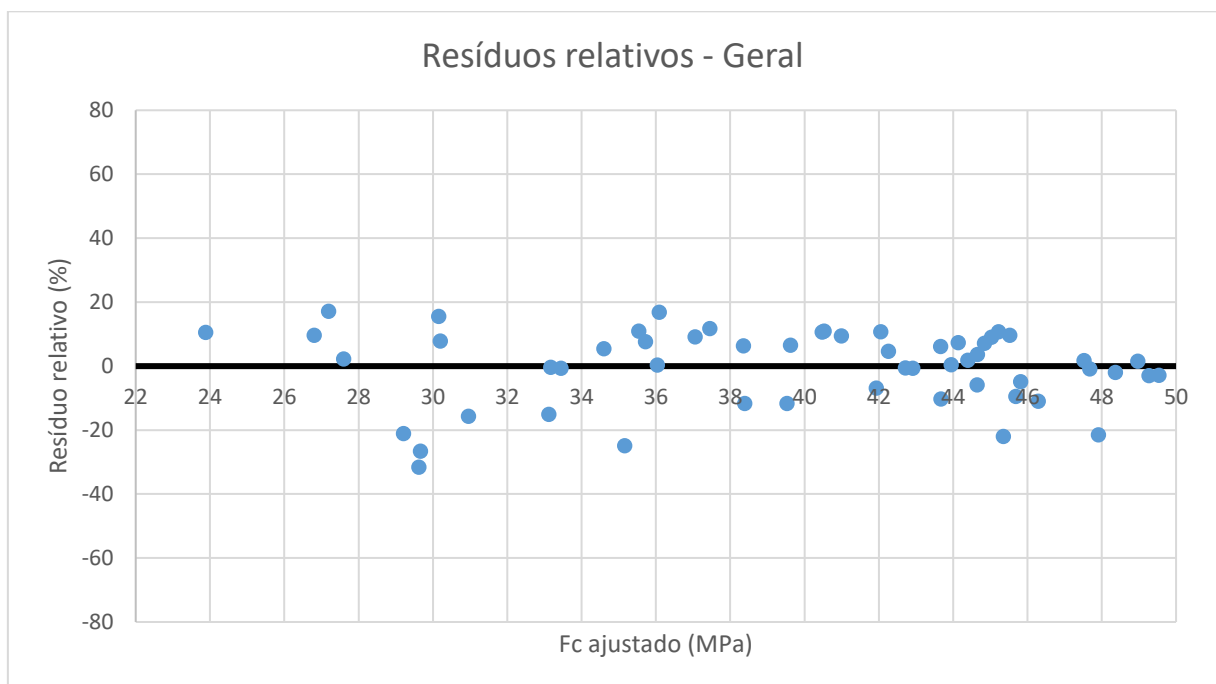
Com o intuito de melhorar o ajuste, um novo tratamento estatístico com eliminação de “outliers” foi realizado. Após essa eliminação, a Figura 69 mostra a nova curva geral que representa a correlação entre a resistência à compressão do concreto (f_c) e a resistividade elétrica superficial (RES). Na Figura 70, estão representados os novos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à compressão ajustados. A Figura 71 relaciona os valores de resistência à compressão medidos com os ajustados.

Figura 69 - Curva de correlação geral entre f_c e RES



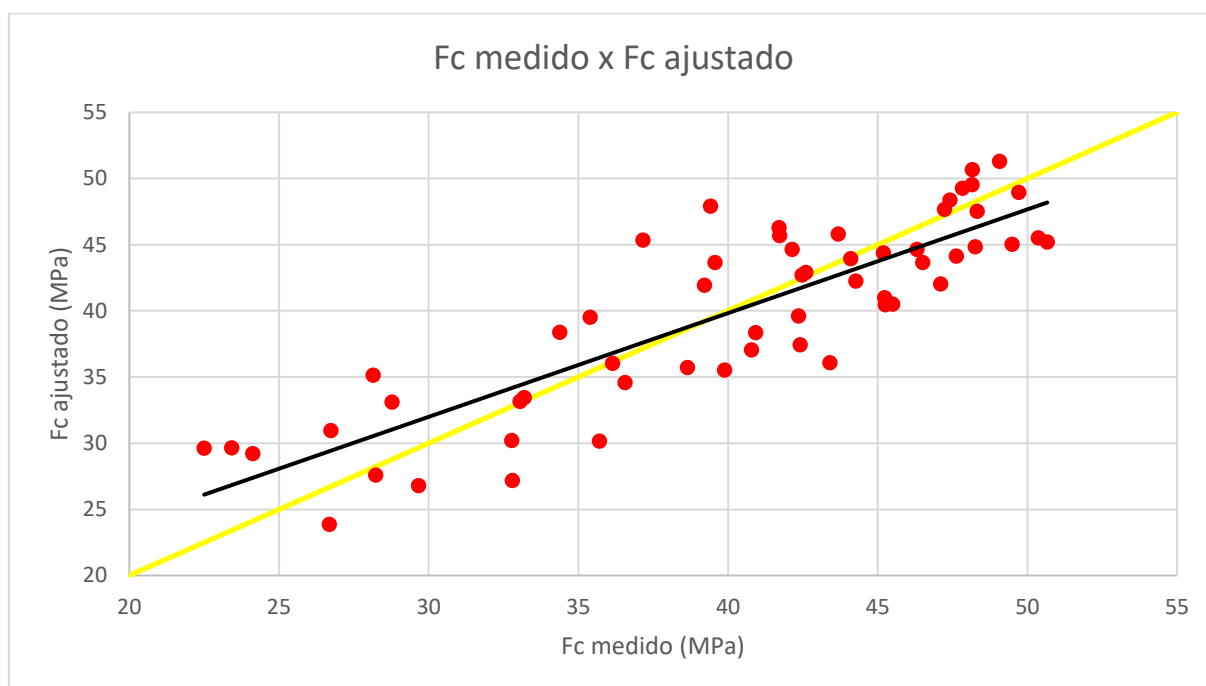
Fonte: autoria própria.

Figura 70 - Análise dos resíduos relativos entre f_c ajustado e RES (Geral)



Fonte: autoria própria.

Figura 71 – Relação entre os valores de resistência à compressão medidos e os valores de resistência à compressão ajustados (Geral)



Fonte: autoria própria.

A Tabela 13 compara os valores dos coeficientes de determinação (r^2) de todas as curvas de correlações geradas.

Tabela 13 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação (fc x RES)

Identificação da curva	Coeficiente de determinação (r^2)
C30	0,8261
C40	0,731
C50	0,8382
Geral	0,7368*
* R^2 após segundo tratamento estatístico dos dados.	

Fonte: autoria própria.

A Tabela 13 evidencia que as curvas de correlação C30 e C50 apresentam r^2 maiores do que a curva de correlação geral, determinada após o segundo tratamento de dados, enquanto a curva C40 apresenta r^2 praticamente igual a esta. Essa situação foi acarretada pela diferença existente entre as medidas de resistividade elétrica superficial e os valores de resistência à compressão nos concretos C30-A e C50-A. Ao passo que o concreto C30-A apresentou medidas de resistividades elétricas maiores em relação ao

tempo do que o concreto C50-A, o inverso ocorreu ao comparar os valores de resistência à compressão de ambos em relação ao tempo. Dessa forma, ao reunir as três classes em um único conjunto, a curva de correlação geral, mesmo após segundo tratamento, não apresentou um melhor ajustamento do que as curvas para cada classe.

Essa pesquisa recomenda utilizar as curvas de correlação para cada classe quando for sabido, antecipadamente, a classe do concreto a qual se deseja estimar o valor de resistência à compressão. Recomenda-se utilizar a curva de correlação geral quando a primeira condição não se estabelecer. Diante disso, as curvas de correlação para a estimativa da resistência à compressão, por meio de medidas obtidas pelo ensaio de resistividade elétrica superficial, estão dispostas nas Equações 12, 13, 14 e 15.

$$\text{C30:} \quad f_c = 16,307\ln(\text{RES}) + 13,475 \quad (12)$$

$$\text{C40:} \quad f_c = 11,993\ln(\text{RES}) + 28,211 \quad (13)$$

$$\text{C50:} \quad f_c = 11,586\ln(\text{RES}) + 30,924 \quad (14)$$

$$\text{Geral:} \quad f_c = 15,985\ln(\text{RES}) + 23,221 \quad (15)$$

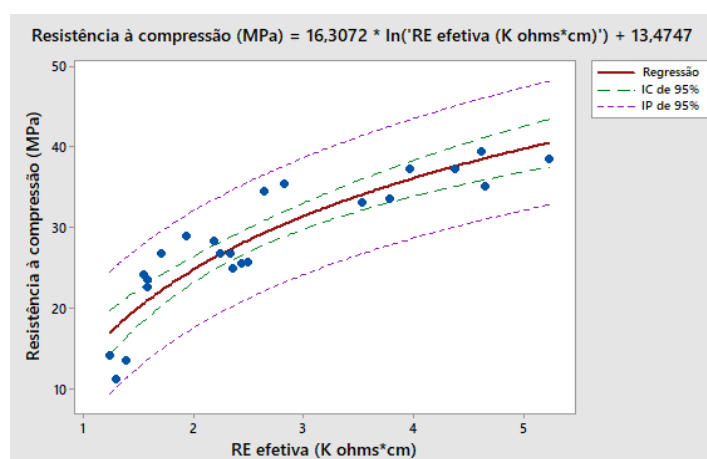
onde:

f_c = resistência à compressão em MPa;

RES = resistividade elétrica superficial corrigida pelo coeficiente de correção de geometria, valores obtidos variam entre 1 a 6 $K\Omega \cdot \text{cm}$.

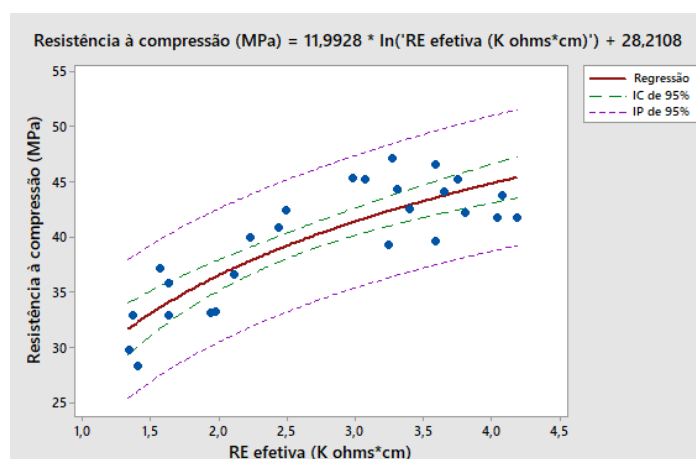
Com o auxílio do programa Minitab 18, foram construídas, automaticamente, as curvas de correlação, juntamente com seus intervalos de confiança de 95% e de predição de 95% (Figuras 72, 73, 74 e 75).

Figura 72 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C30



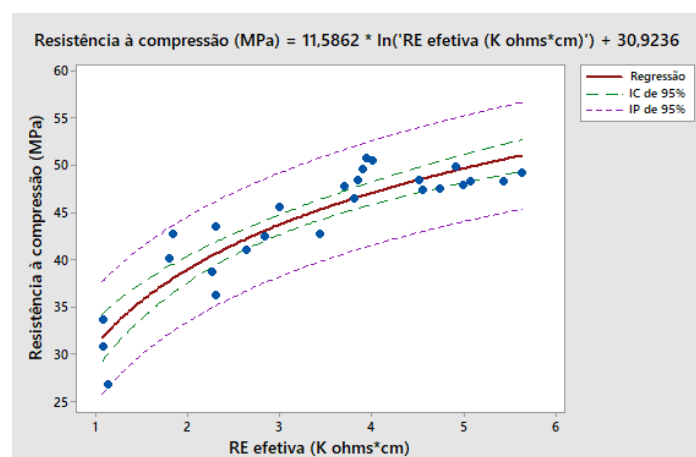
Fonte: autoria própria.

Figura 73 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C40



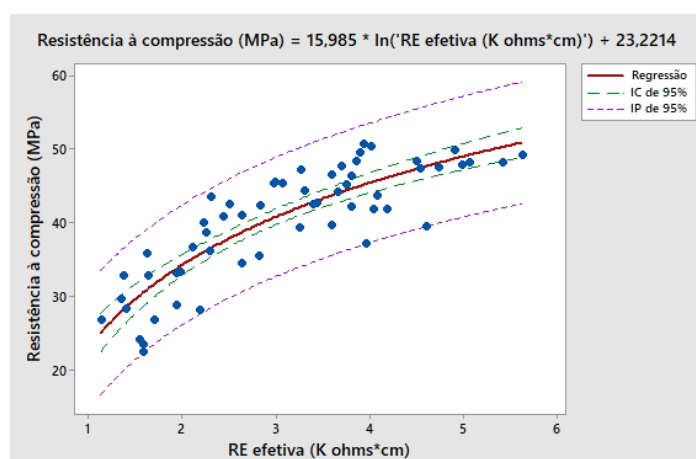
Fonte: autoria própria.

Figura 74 - Curva de correlação entre f_c e RES para a classe C50



Fonte: autoria própria.

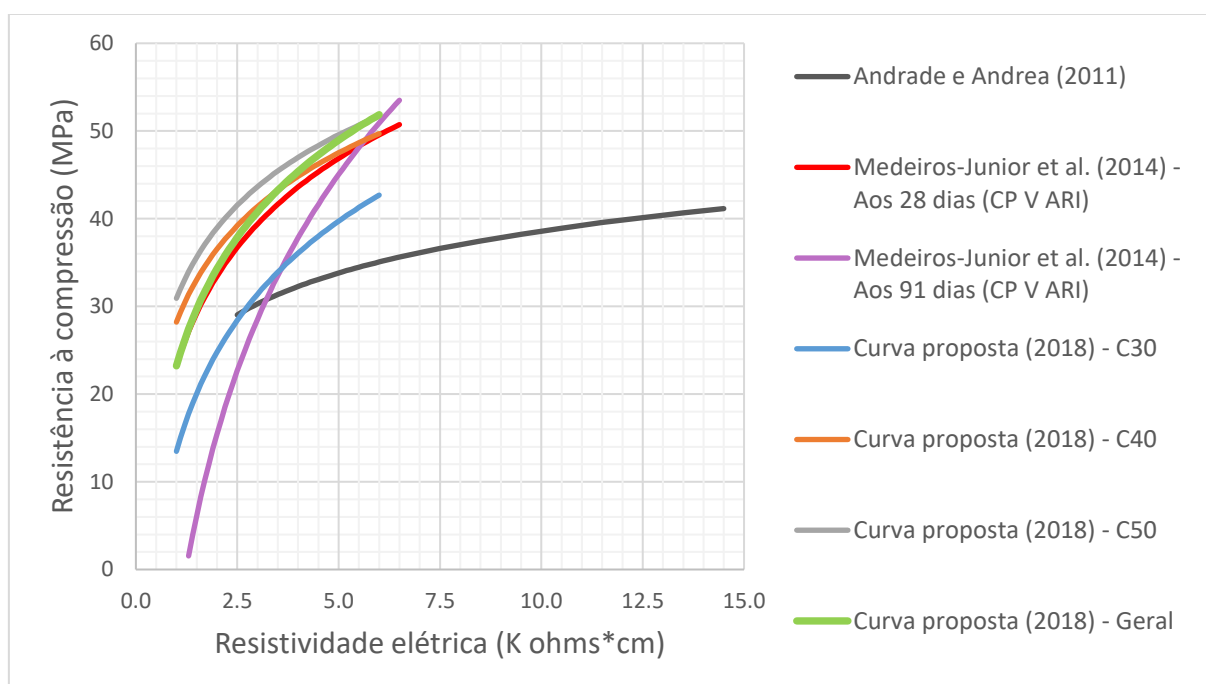
Figura 75 - Curva de correlação entre f_c e RES (Geral)



Fonte: autoria própria.

Uma comparação entre as curvas propostas por diversos autores e as propostas neste trabalho são apresentadas na Figura 76.

Figura 76 - Comparação entre as curvas (f_c versus RES)



Fonte: autoria própria.

A Figura 76 demonstra a existência de uma variação significativa entre as curvas propostas por diversos autores e as propostas neste trabalho. Contudo, a curva de Medeiros-Junior *et al.* (2014) aos 28 dias é a mais próxima da curva de correlação geral, a qual se diferencia pela estimativa de valores de resistência à compressão relativamente menores com a mesma medida de resistividade.

Existe uma carência de pesquisas que visam a obtenção de curva de correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão do concreto. Durante a realização deste trabalho, só foram encontrados dois estudos dentro desta temática, os quais utilizam o método de Wenner nos corpos de prova saturados, porém não informaram se corrigiram os valores de resistividade em relação a geometria dos corpos de prova, ou seja, não foi informado sobre a utilização do coeficiente de correção da geometria.

4.4.3. Resistência à tração por compressão diametral x Esclerometria ($f_{ct,sp}$ x $IE\alpha$)

Nos estudos de regressão não linear simples, visando a escolha da curva que melhor representasse a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$), foram testados quatro modelos de correlação para cada classe de concreto (C30/C40/C50). No Quadro 10, estão dispostos os resultados de r^2 obtidos para cada uma das curvas.

Quadro 10 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à tração ($f_{ct,sp}$) e índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$)

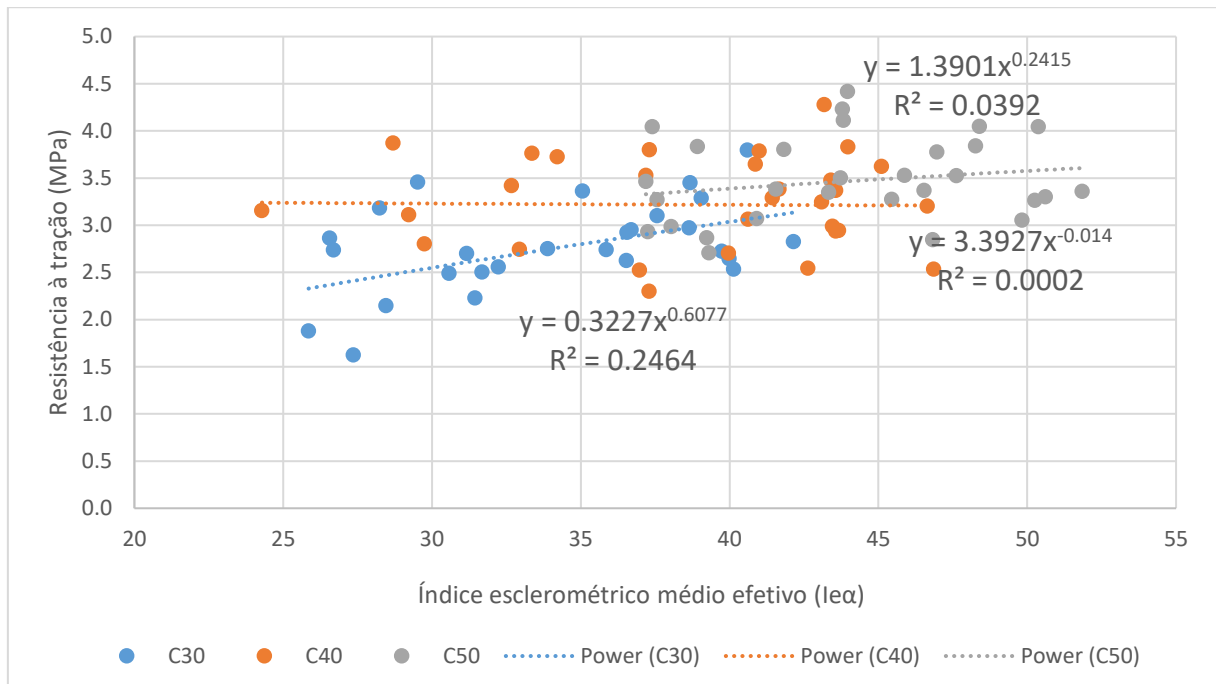
Tipo de curva	r^2		
	C30	C40	C50
Exponencial	0,2389	0,0003	0,0353
Linear	0,2198	0,0002	0,0297
Logarítmica	0,2247	0,0001	0,0334
Potência	0,2464	0,0002	0,0392

Fonte: autoria própria.

A curva de correlação que melhor se ajusta aos dados experimentais foi a gerada pela função potencial. É inferido pela interpretação dos valores dos coeficientes de determinação (r^2), que todas as curvas de correlação escolhidas apresentam baixíssimos poderes de explicação entre as variáveis analisadas.

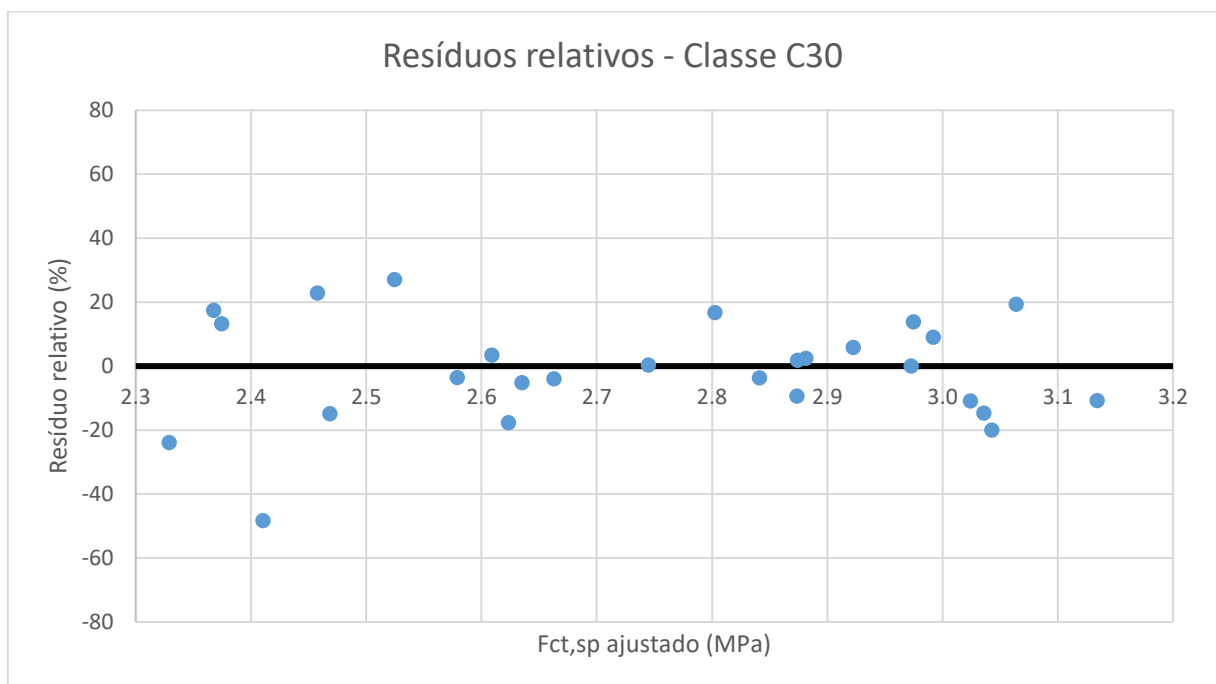
A Figura 77 mostra as três curvas escolhidas para representar a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Nas Figuras 78, 79 e 80, estão representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados para cada classe do concreto.

Figura 77 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para cada classe do concreto



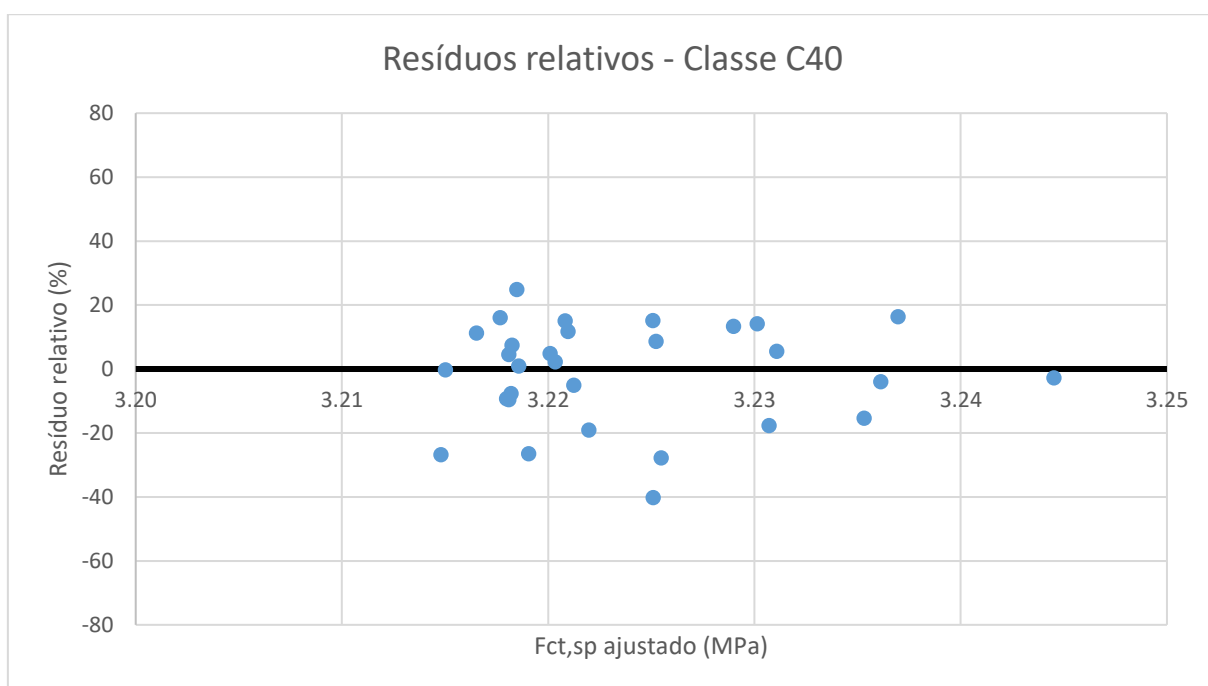
Fonte: autoria própria.

Figura 78 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30



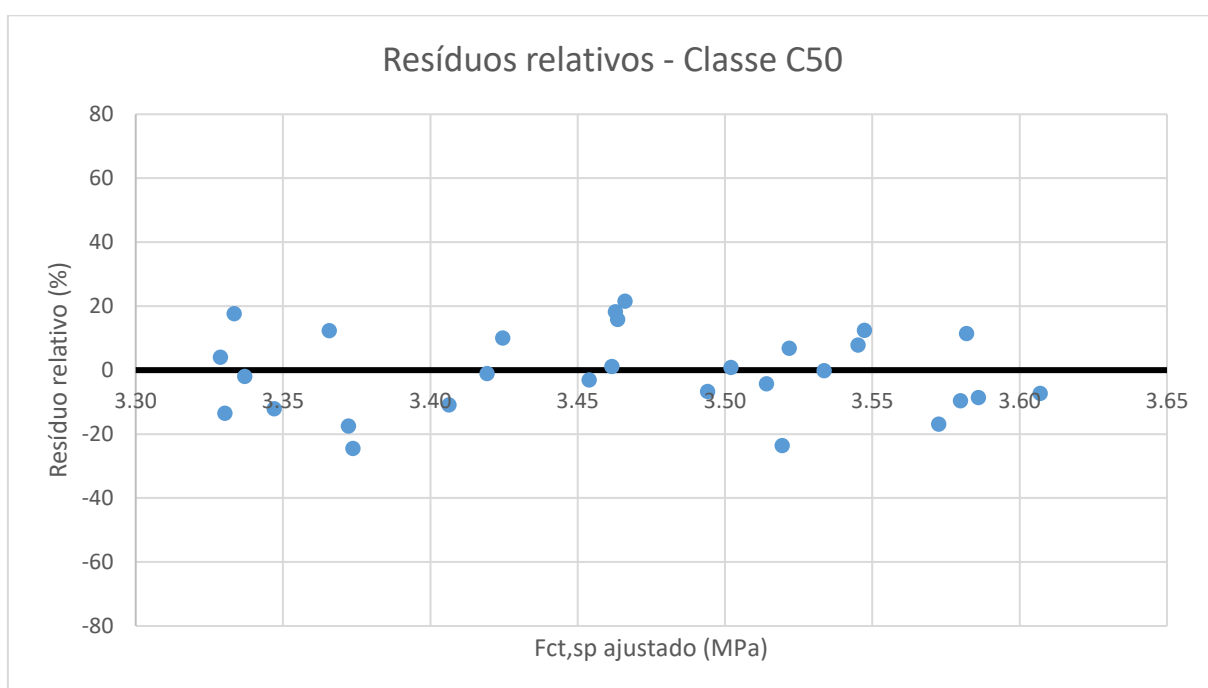
Fonte: autoria própria.

Figura 79 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40



Fonte: autoria própria.

Figura 80 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C50



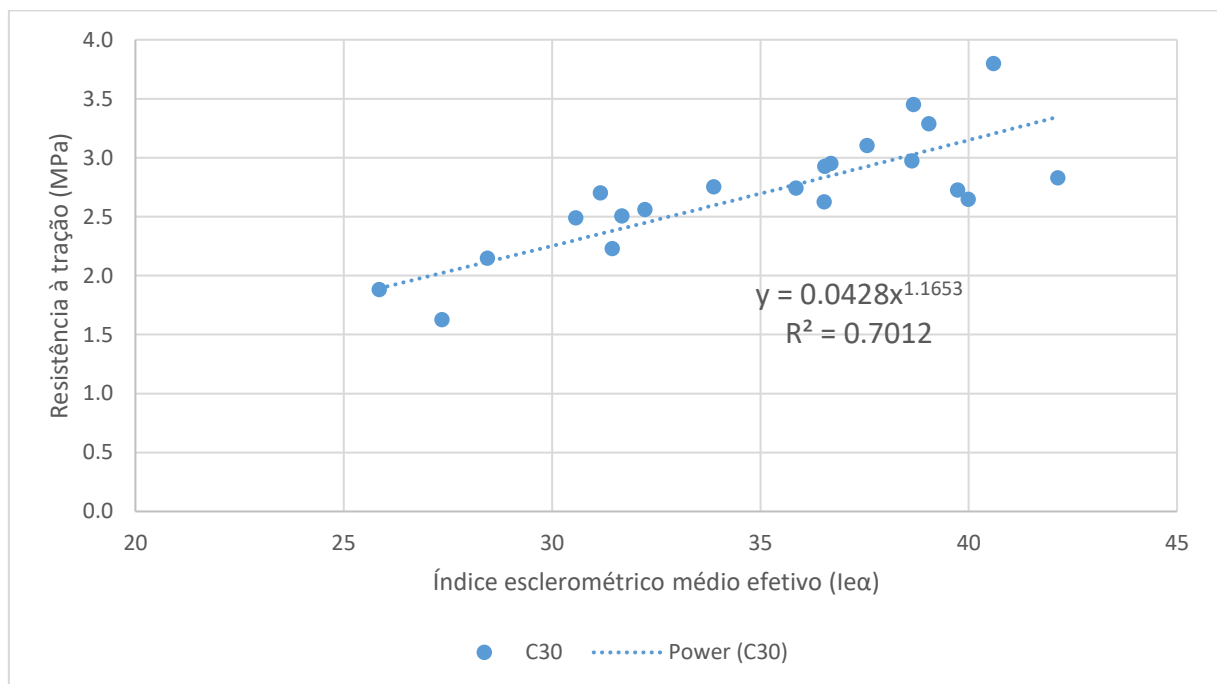
Fonte: autoria própria.

Os dados que apresentaram resíduo relativo (Re_r) maior ou igual à 20%, como também os dados visualmente distantes da curva, foram considerados suspeitos de serem “outliers”. Diante disso, foi realizada a avaliação individual de cada dado experimental,

através da verificação do aumento ou diminuição do valor do r^2 , para decidir pela sua eliminação ou permanência.

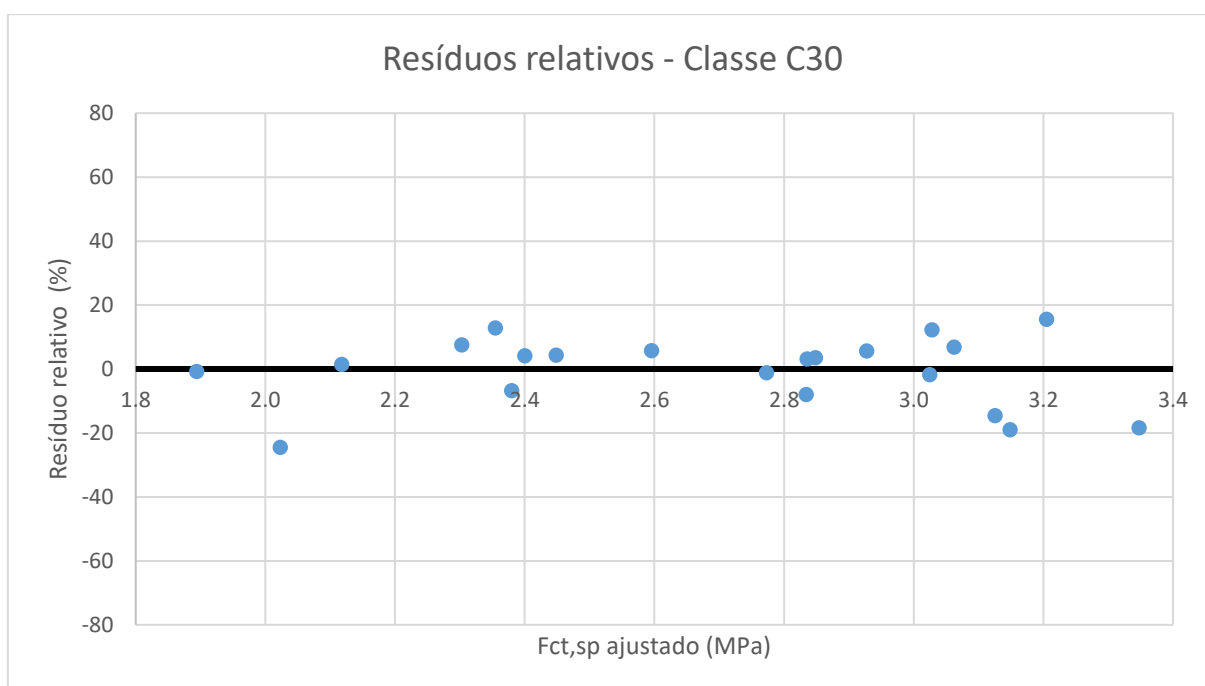
Após a eliminação dos “outliers”, as Figuras 81, 84 e 87 mostram as três novas curvas definidas para representar a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Nas Figuras 82, 85 e 88, estão representados os novos valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados para cada classe do concreto. As Figuras 83, 86 e 89 relacionam os valores de resistência à tração medidos com os ajustados, quanto menor o ângulo formado entre a reta na cor preta com a reta de cor amarela, mais próximos são os valores medidos em relação aos ajustados, isto é, melhor a qualidade do ajuste.

Figura 81 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C30



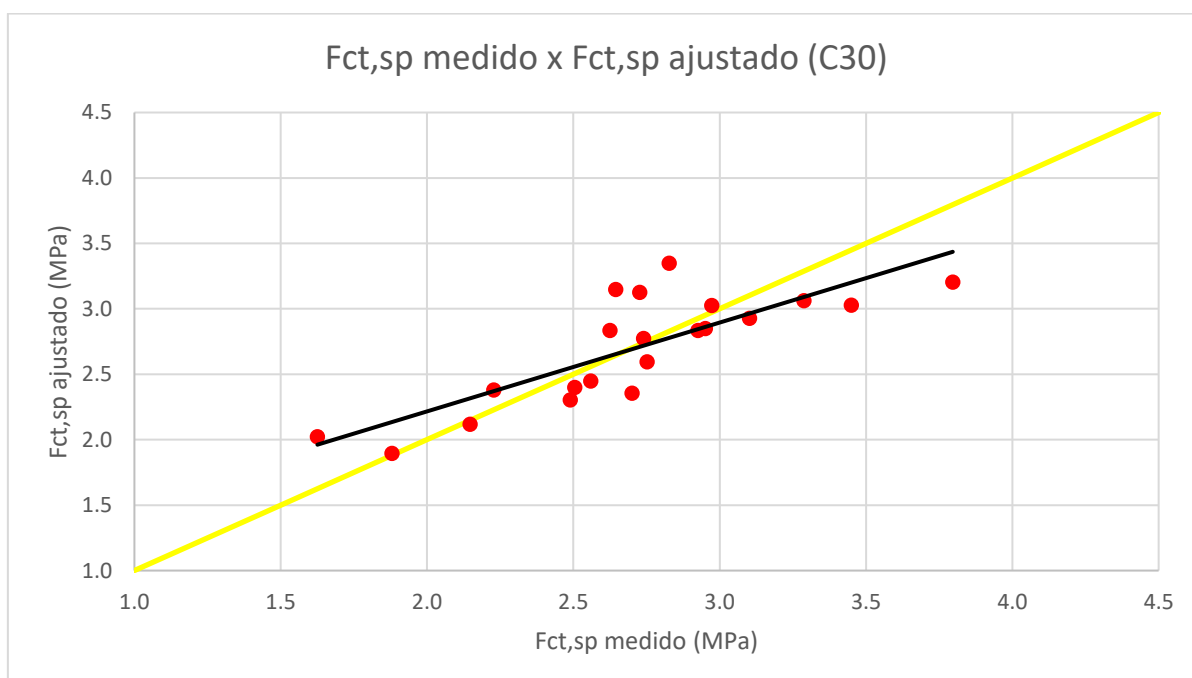
Fonte: autoria própria.

Figura 82 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C30



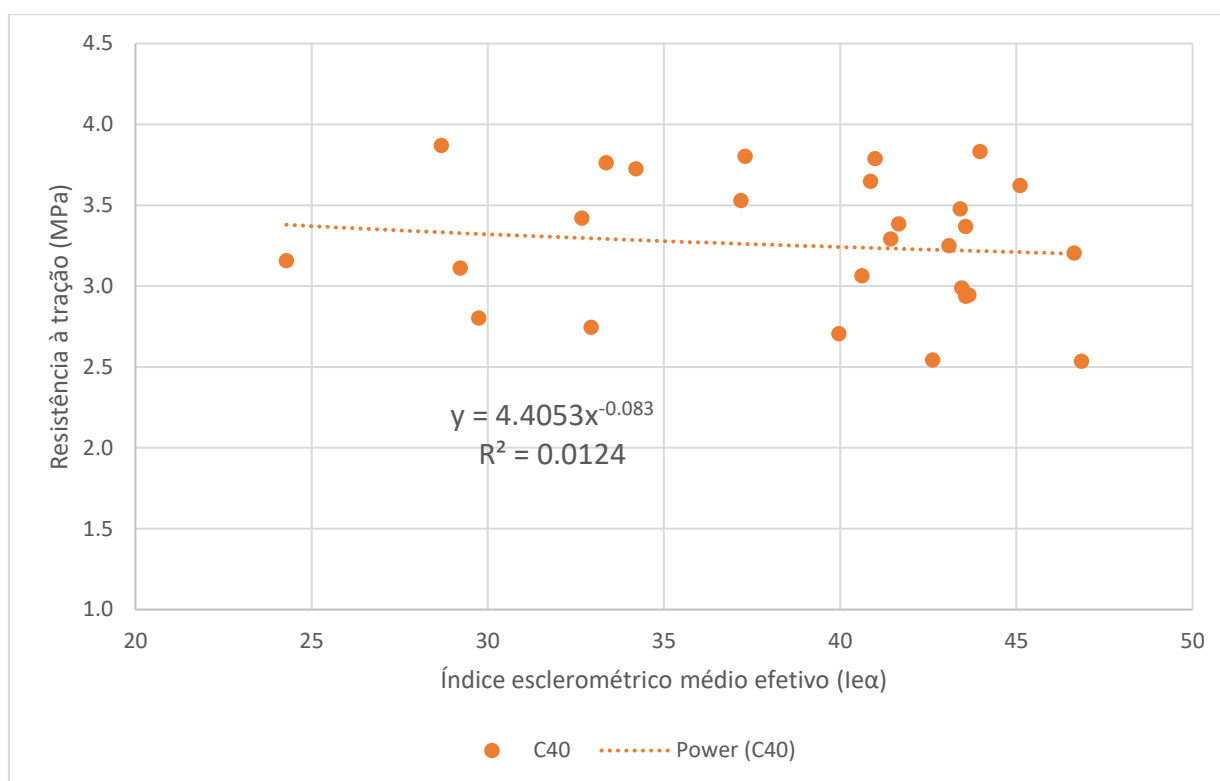
Fonte: autoria própria.

Figura 83 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C30)



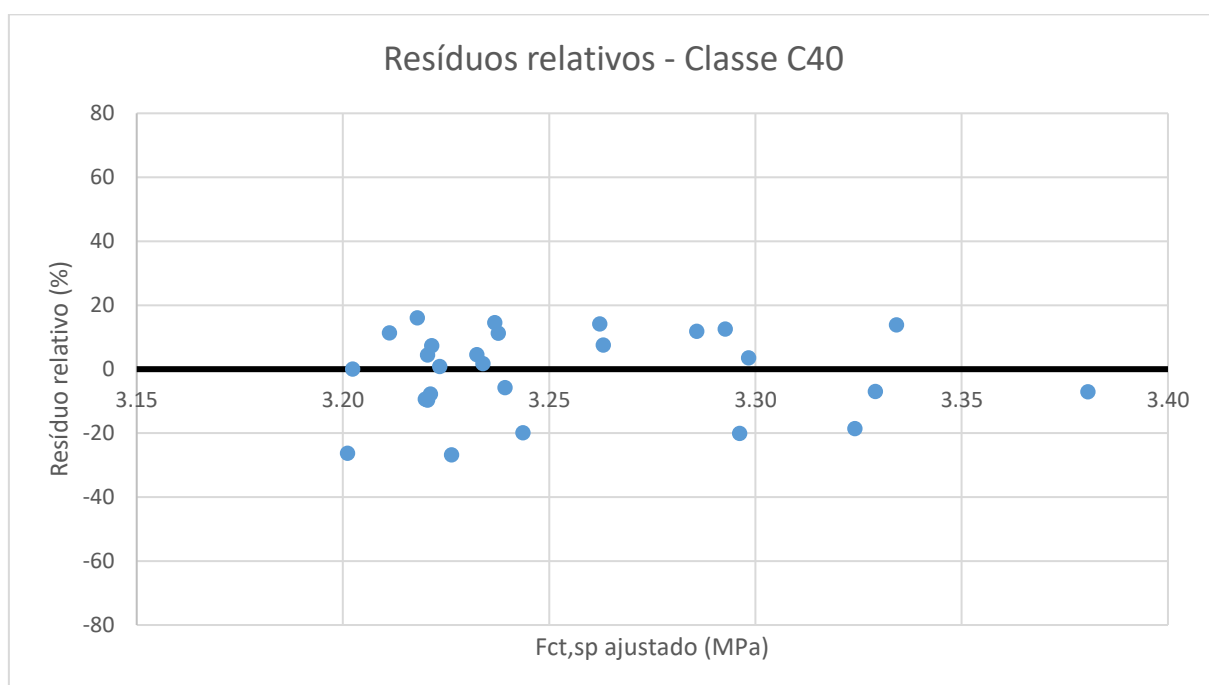
Fonte: autoria própria.

Figura 84 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C40



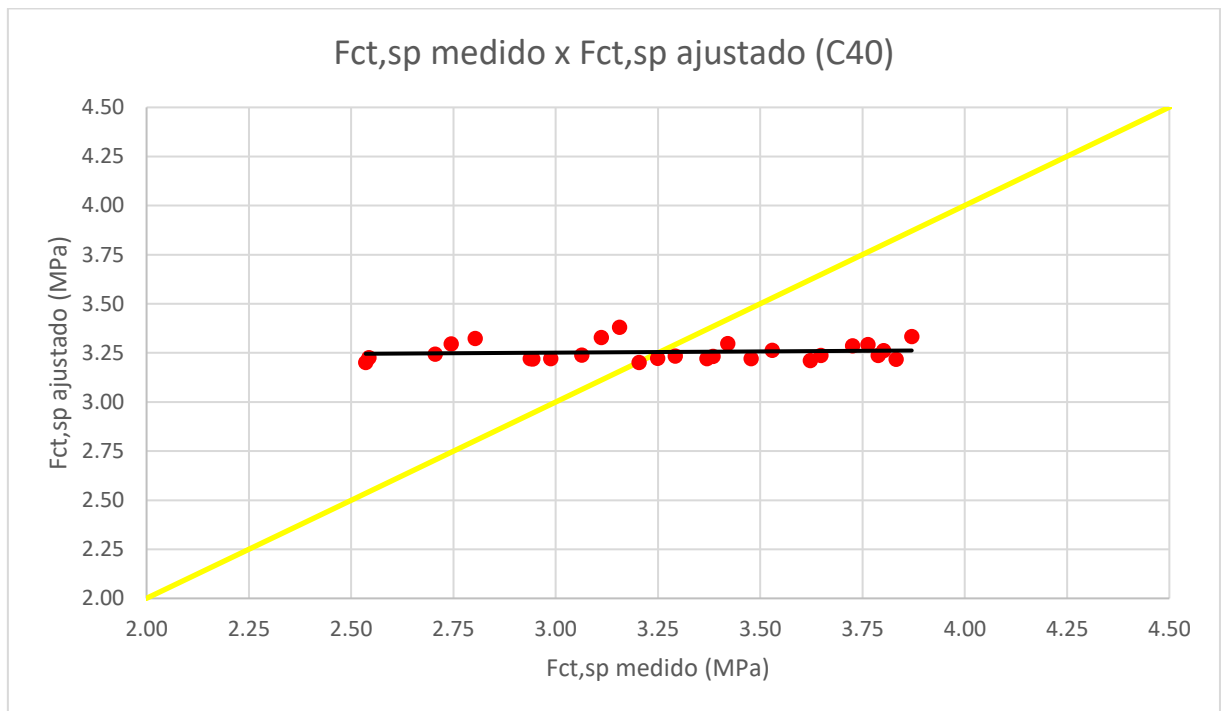
Fonte: autoria própria.

Figura 85 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ para a classe C40



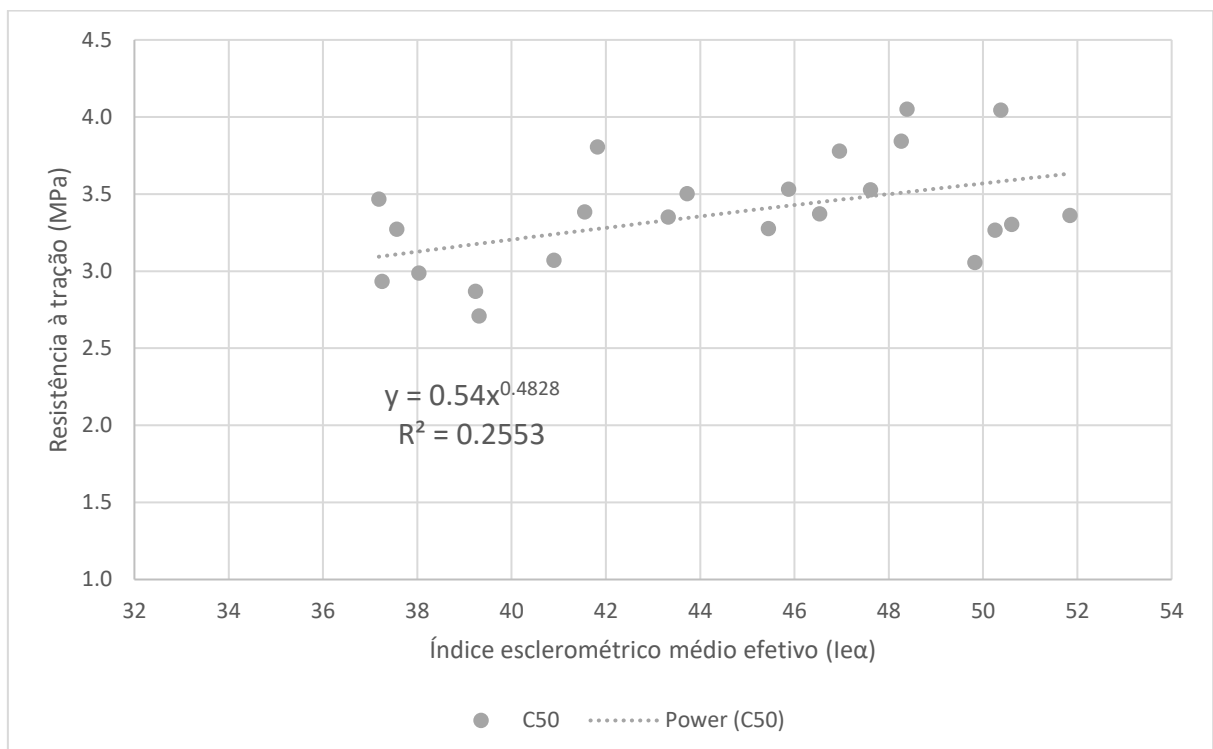
Fonte: autoria própria.

Figura 86 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C40)



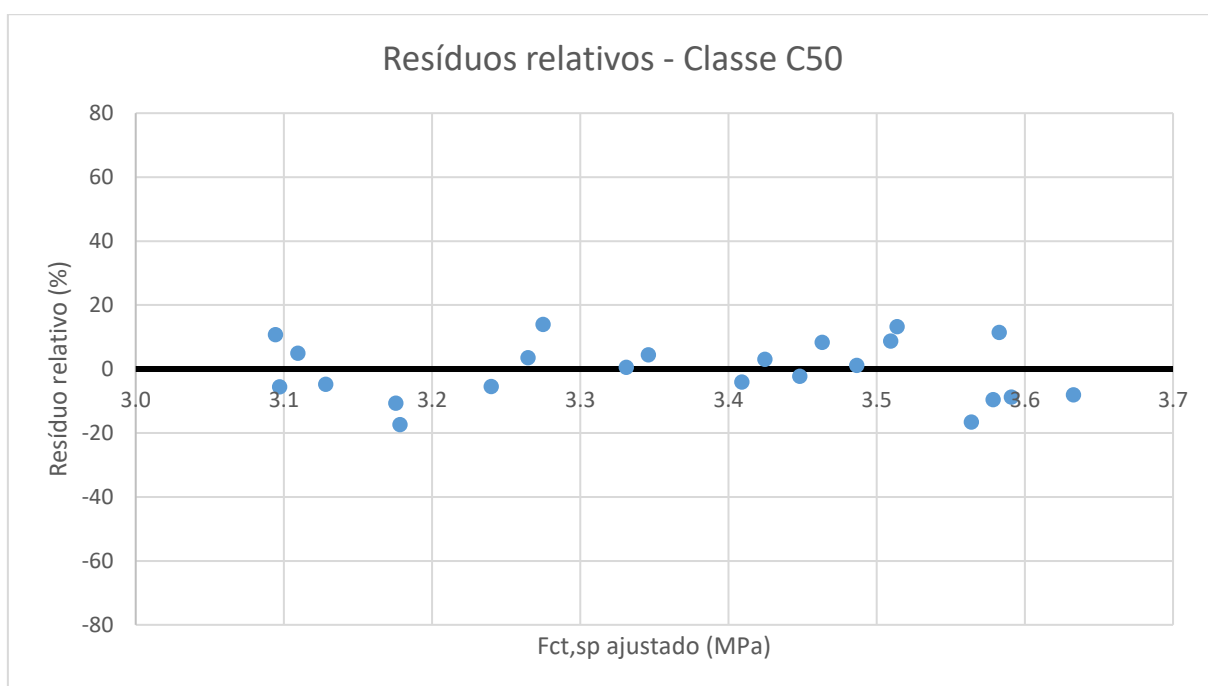
Fonte: autoria própria.

Figura 87 - Curva de correlação entre fct,sp e IEα para a classe C50



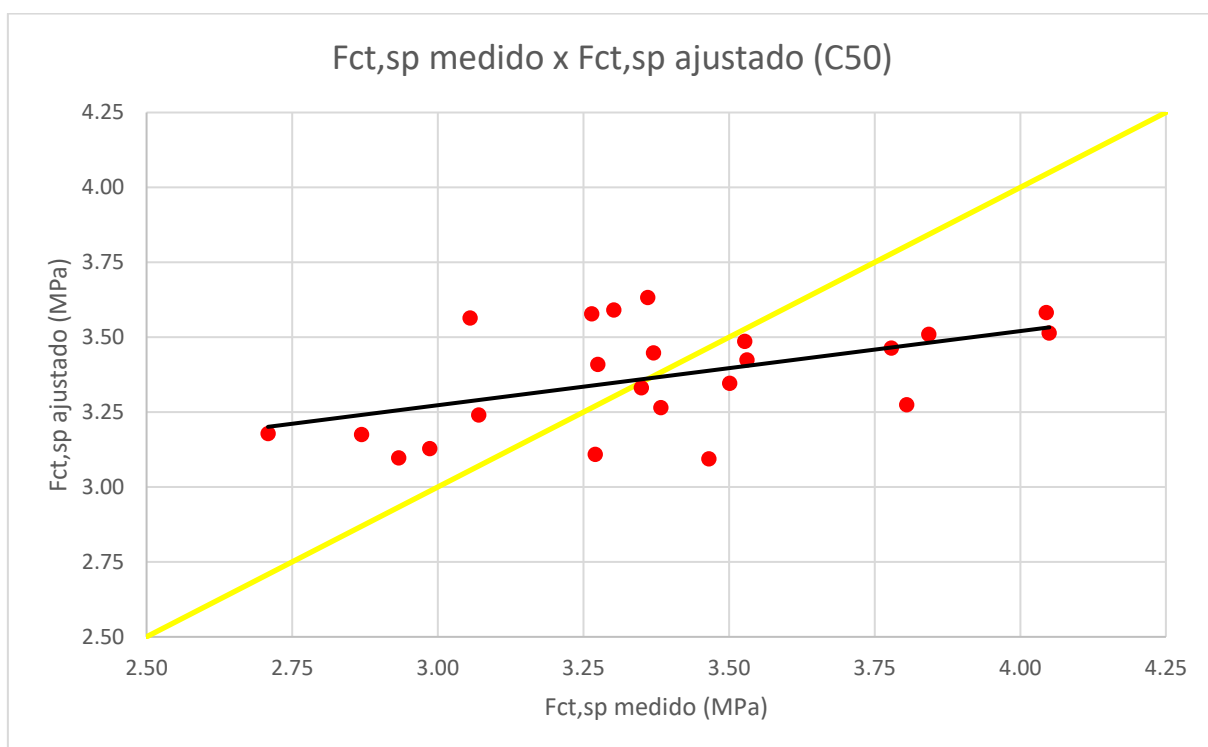
Fonte: autoria própria.

Figura 88 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e IE α para a classe C50



Fonte: autoria própria.

Figura 89 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C50)



Fonte: autoria própria.

A Figura 81 evidencia uma melhora significativa no ajustamento dos valores de resistência à tração aos valores de índices esclerométricos médios efetivos para a classe C30, já que o r^2 aumentou de 0,2464 para 0,7012, após a eliminação dos “outliers”. A mesma situação não ocorreu para as classes C40 e C50 (Figuras 84 e 88). Para a classe C40, o r^2 passou de 0,0002 para 0,0124 e, a curva de correlação determinada apresentou tendência decrescente, o que não é esperado para correlações entre essas variáveis. Para a classe C50, o r^2 passou de 0,0392 para 0,2553. Diante disso, a curva para a classe C30 apresentou médio poder de explicação para a correlação, enquanto que as curvas para as classes C40 e C50 não apresentaram correlação entre as variáveis analisadas.

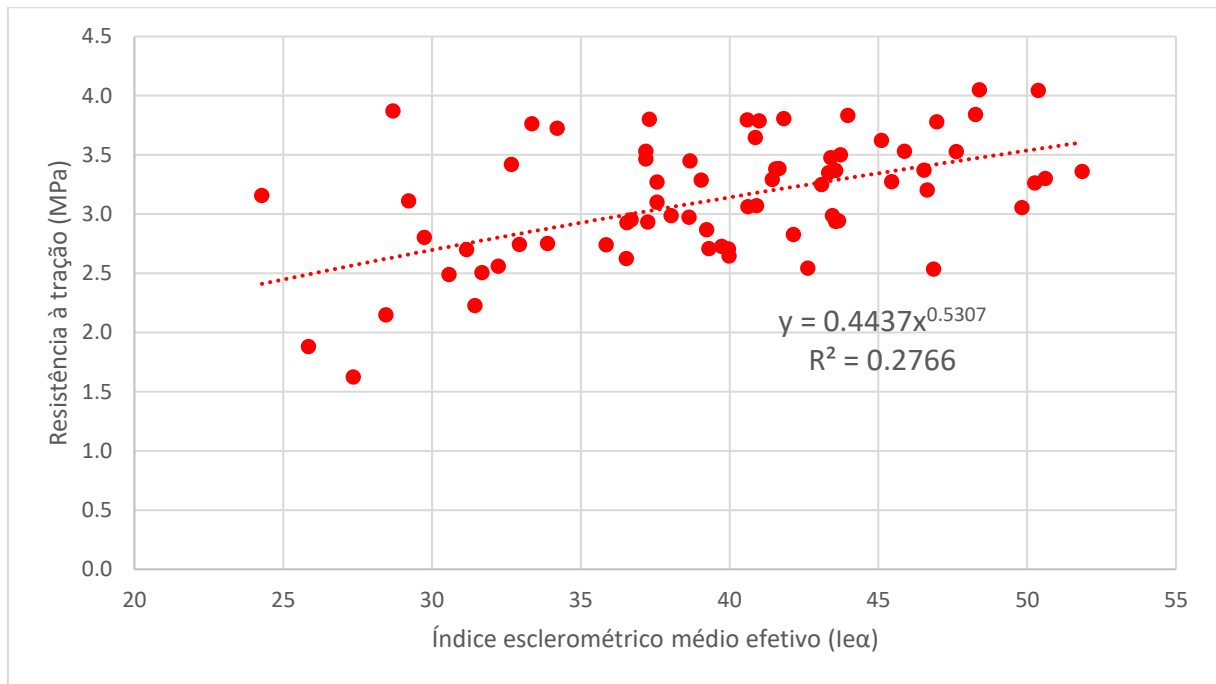
A mesma interpretação pode ser realizada por meio das Figuras 83, 86 e 89, as quais permitem avaliar a qualidade do ajuste. Como pode ser visto, os ângulos formados entre a reta na cor preta com a reta de cor amarela, das classes C40 e C50 são significativamente maiores do que para a classe C30, cuja curva apresenta um bom ajuste.

Pode ser verificado, pela análise das Figuras 82, 85 e 88, que poucos valores de resíduos relativos da classe C30 e C40 estão acima de 20%. Os dados experimentais, que geraram esses resíduos, não foram eliminados para não prejudicar a respectiva curva de correlação.

Os resíduos relativos para as curvas determinadas para as classes C40 e C50 foram baixos, apesar das respectivas curvas apresentarem péssima correlação. Os baixos valores dos resíduos são devido à pouca variação nos valores de resistência à tração, enquanto que a falta de poder de explicação da curva é acarretando pela diferença de crescimento dos valores de resistência à tração em relação aos valores de índices esclerométricos médios efetivos.

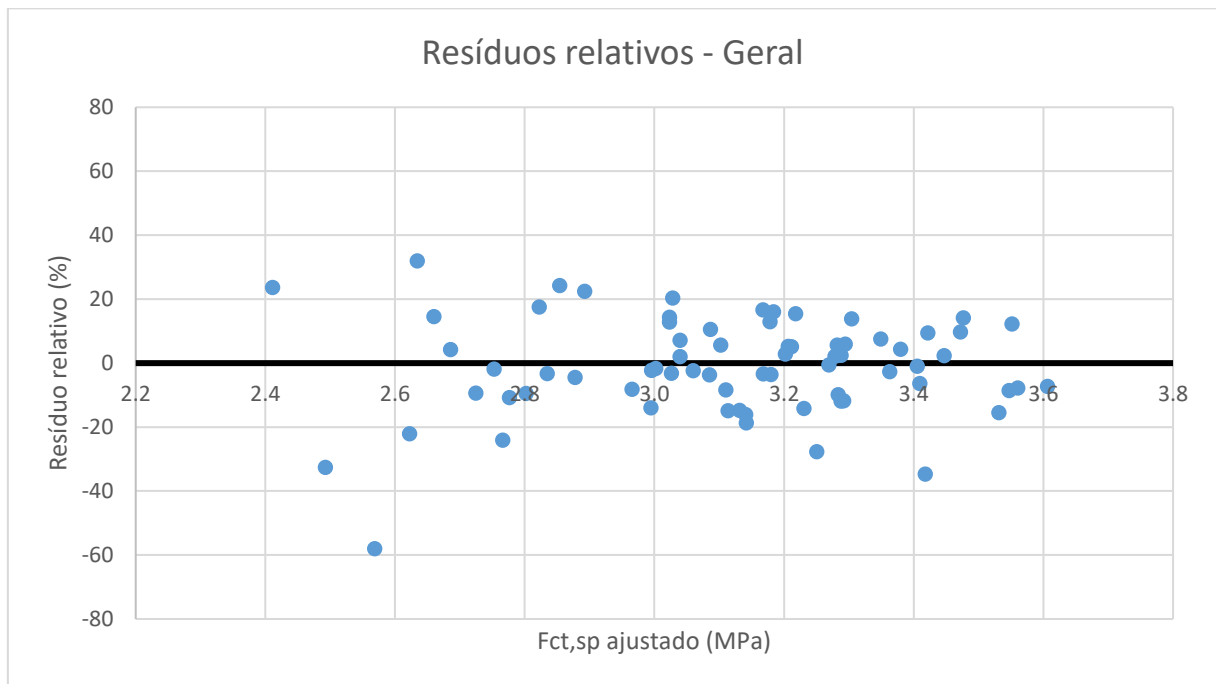
Após esta etapa, os dados experimentais remanescentes foram reunidos em um único conjunto para a determinar uma curva geral para as três classes de concreto. A Figura 90 mostra a curva geral para representar a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Na Figura 91, estão representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados para o conjunto das classes.

Figura 90 - Curva de correlação geral entre fct,sp e IEα



Fonte: autoria própria.

Figura 91 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e IEα (Geral)

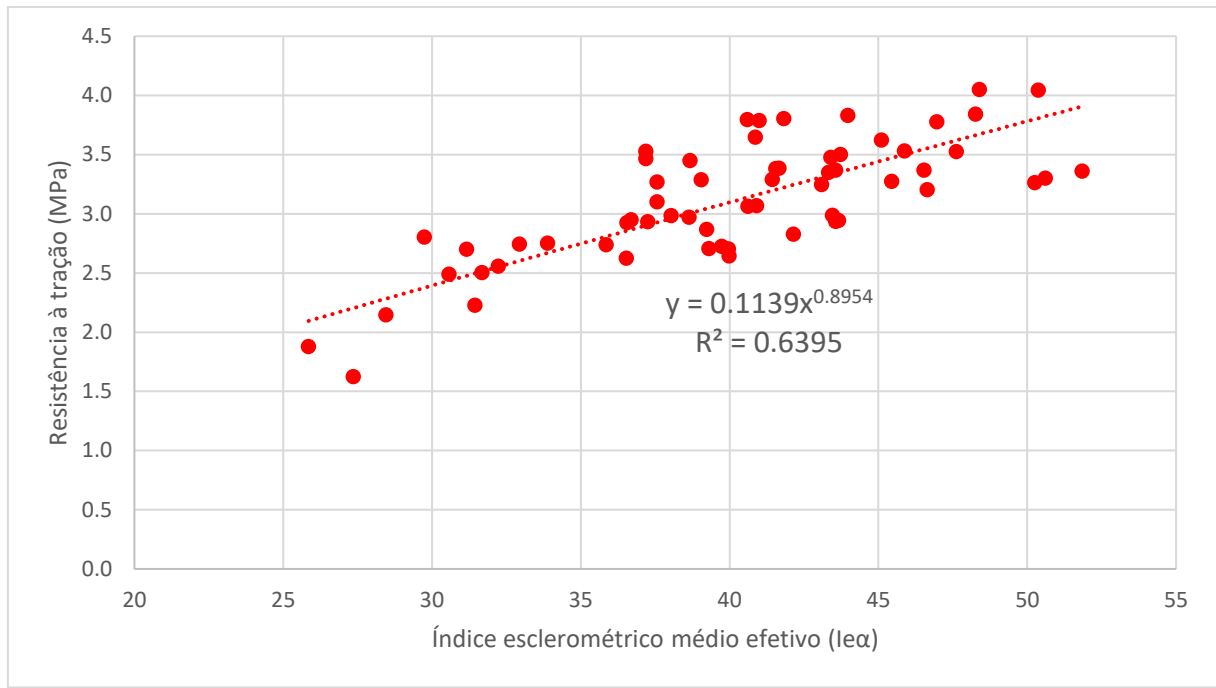


Fonte: autoria própria.

Com o intuito de melhorar o ajuste, um novo tratamento estatístico com eliminação de “outliers” foi realizado. Após essa eliminação, a Figura 92 mostra a nova curva geral que representa a correlação entre a resistência à tração do concreto (fct,sp) e

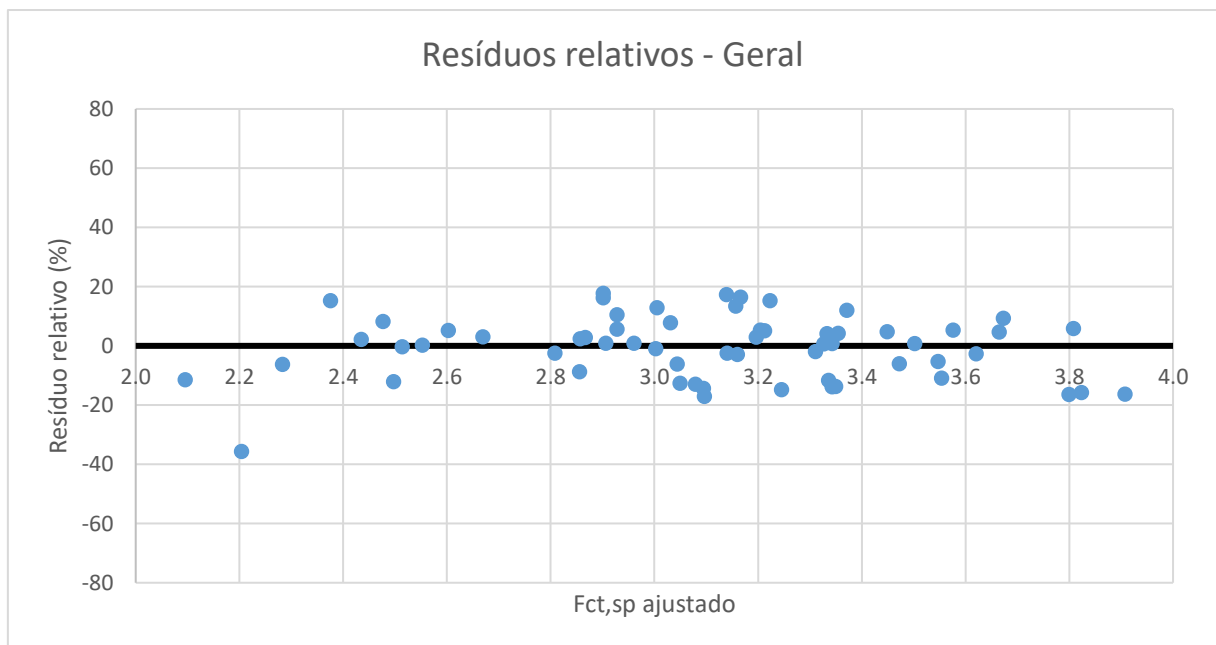
o índice esclerométrico médio efetivo ($IE\alpha$). Na Figura 93, estão representados os novos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados. A Figura 94 relaciona os valores de resistência à tração medidos com os ajustados.

Figura 92 - Curva de correlação geral entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$



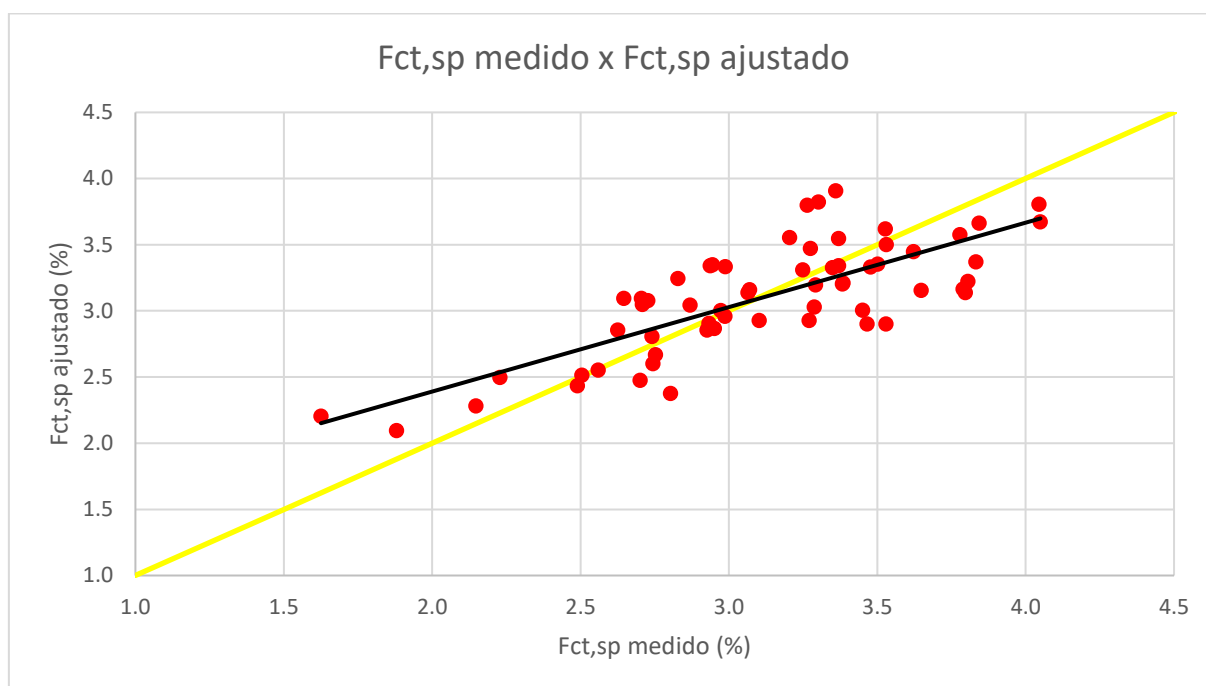
Fonte: autoria própria.

Figura 93 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e $IE\alpha$ (Geral).



Fonte: autoria própria.

Figura 94 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Geral)



Fonte: autoria própria.

A Tabela 14 compara os valores dos coeficientes de determinação (r^2) de todas as curvas de correlações geradas.

Tabela 14 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação (fct,sp x $IE\alpha$)

Identificação da curva	Coeficiente de determinação (r^2)
C30	0,7012
C40	0,0124
C50	0,2553
Geral	0,6395*
* R^2 após segundo tratamento estatístico dos dados.	

Fonte: autoria própria.

Diante dos valores de r^2 expostos na Tabela 14, verifica-se que a curva para a classe C30 e a curva geral, após segundo tratamento de dados, são as únicas que possuem médio poder de explicação para a correlação fct,sp versus $IE\alpha$. A ausência de correlação para as classes C40 e C50 pode ser explicada através da análise dos gráficos que mostram a relação da resistência à tração com o tempo (Figuras 27 e 28 da Seção 4.2.2). Estes gráficos foram praticamente constantes para os concretos C40-A, C50-A e C40-B,

indicando possíveis problemas associados à realização dos ensaios de compressão diametral. Contudo, situação diferente ocorreu nos gráficos que mostram a relação dos índices esclerométricos médios efetivos com o tempo (Figuras 29 e 30 da Seção 4.3.1), em que todos os concretos apresentaram crescimento significativo em relação ao tempo, como era esperado para esse ensaio.

Portanto, essa pesquisa recomenda utilizar a curva de correlação para classe C30 quando for sabido, antecipadamente, que essa é a classe do concreto a qual se deseja estimar o valor de resistência à tração. Recomenda-se utilizar a curva de correlação geral quando a primeira condição não se estabelecer. Diante disso, as curvas de correlação para a estimativa da resistência à tração, por meio de índices esclerométricos médios efetivos, estão dispostas nas Equações 16 e 17.

$$\text{C30:} \quad f_{ct,sp} = 0,0428 \cdot IE\alpha^{1,1653} \quad (16)$$

$$\text{Geral:} \quad f_{ct,sp} = 0,1139 \cdot IE\alpha^{0,8954} \quad (17)$$

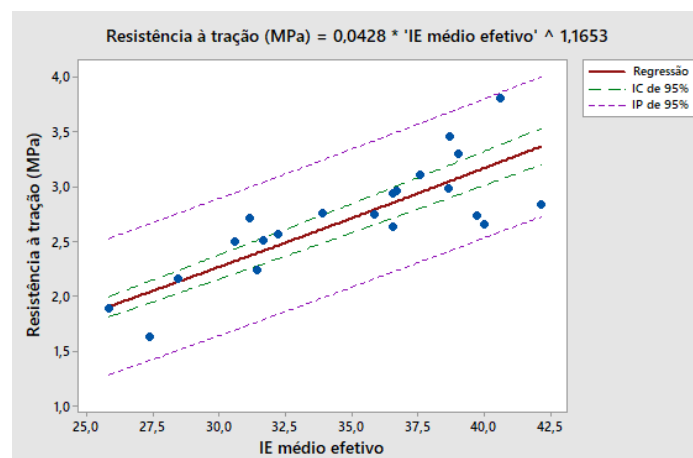
onde:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração em MPa;

$IE\alpha$ = índice esclerométrico médio efetivo que varia entre 25 a 55.

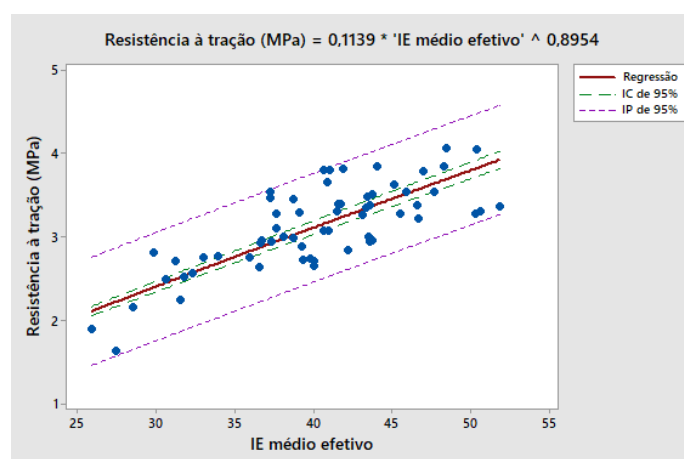
Com o auxílio do programa Minitab 18, foram construídas, automaticamente, a curva de correlação para a classe C30 (Figura 95) e a curva de correlação geral (Figura 96), juntamente com seus intervalos de confiança de 95% e de predição de 95%.

Figura 95 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ para a classe C30



Fonte: autoria própria.

Figura 96 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e $IE\alpha$ (Geral)



Fonte: autoria própria.

4.4.4. Resistência à tração por compressão diametral x Resistividade elétrica superficial ($f_{ct,sp}$ x RES)

Nos estudos de regressão não linear simples, visando a escolha da curva que melhor representasse a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e a resistividade elétrica superficial (RES), foram testados quatro modelos de correlação para cada classe de concreto (C30/C40/C50). No Quadro 11, estão dispostos os resultados de r^2 obtidos para cada uma das curvas.

Quadro 11 - Coeficientes de determinação (r^2) das regressões testadas para correlações entre resistência à tração ($f_{ct,sp}$) e resistividade elétrica superficial (RES)

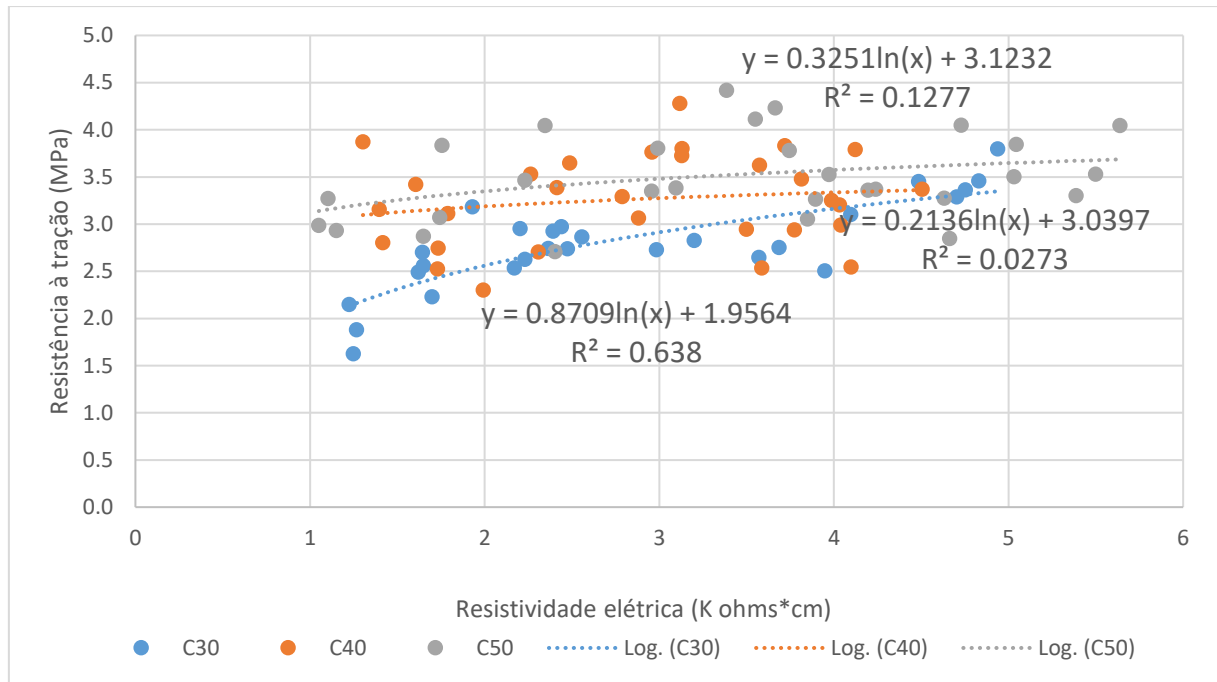
Tipo de curva	r^2		
	C30	C40	C50
Exponencial	0,5601	0,02552	0,1049
Linear	0,6053	0,023	0,0952
Logarítmica	0,638	0,0273	0,1277
Potência	0,6222	0,029	0,1374

Fonte: autoria própria.

A curva de correlação que melhor se ajusta aos dados experimentais foi a gerada pela função logarítmica. É inferido pela interpretação dos valores dos coeficientes de determinação (r^2), que as curvas de correlação escolhidas para a classe C40 e C50 apresentam baixíssimos poderes de explicação entre as variáveis analisadas.

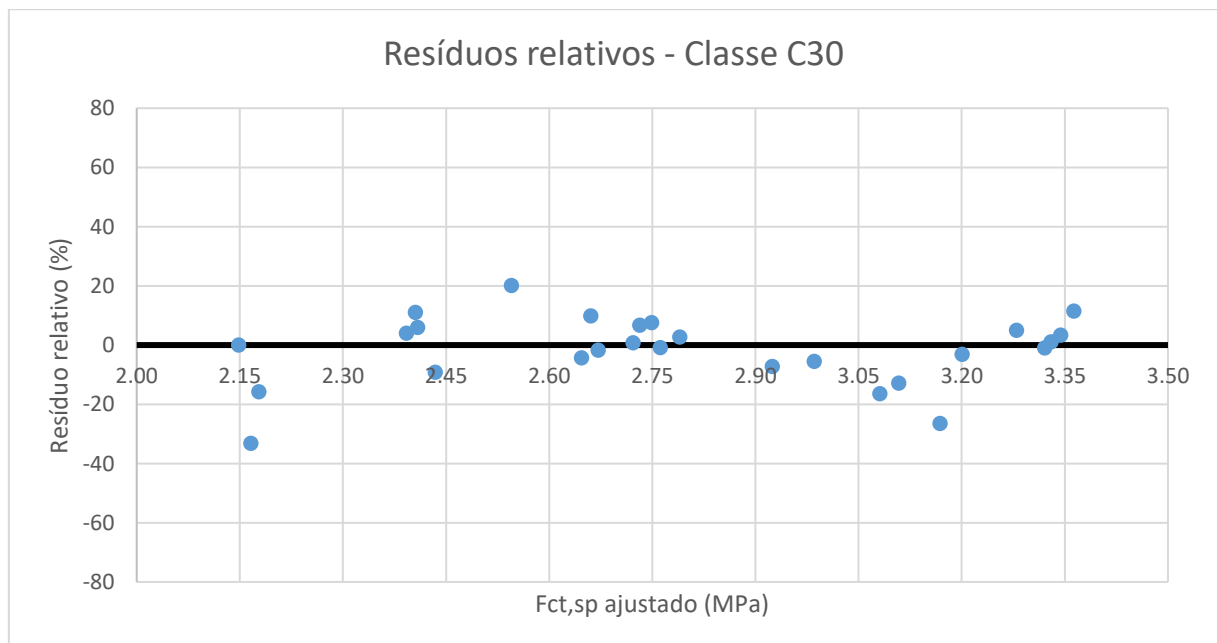
A Figura 97 mostra as três curvas escolhidas para representar a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e a resistividade elétrica superficial (RES). Nas Figuras 98, 99 e 100, estão representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados para cada classe do concreto.

Figura 97 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e RES para cada classe do concreto



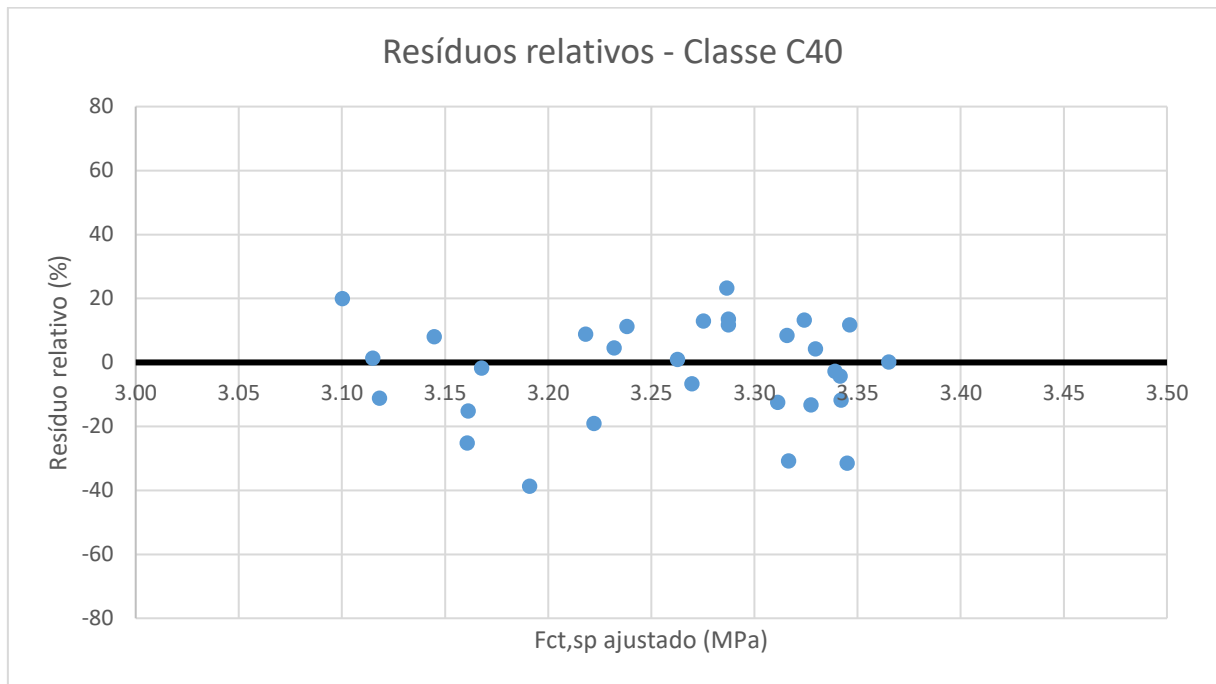
Fonte: autoria própria.

Figura 98 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e RES para a classe C30



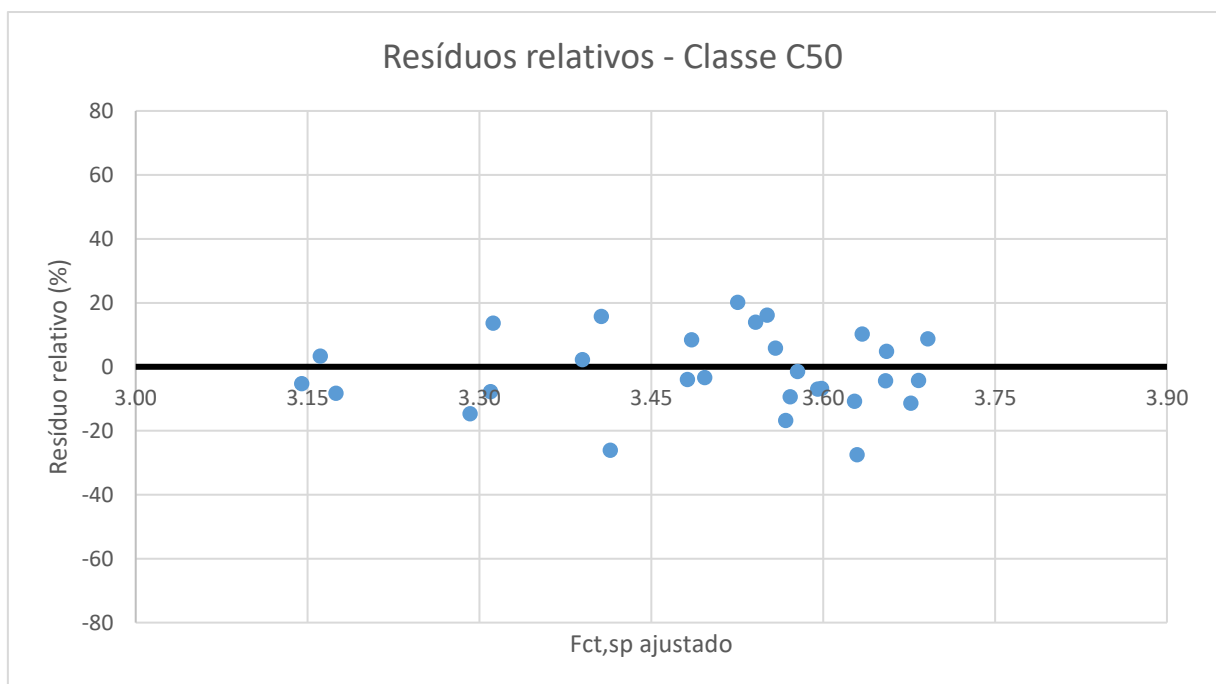
Fonte: autoria própria.

Figura 99 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C40



Fonte: autoria própria.

Figura 100 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C50

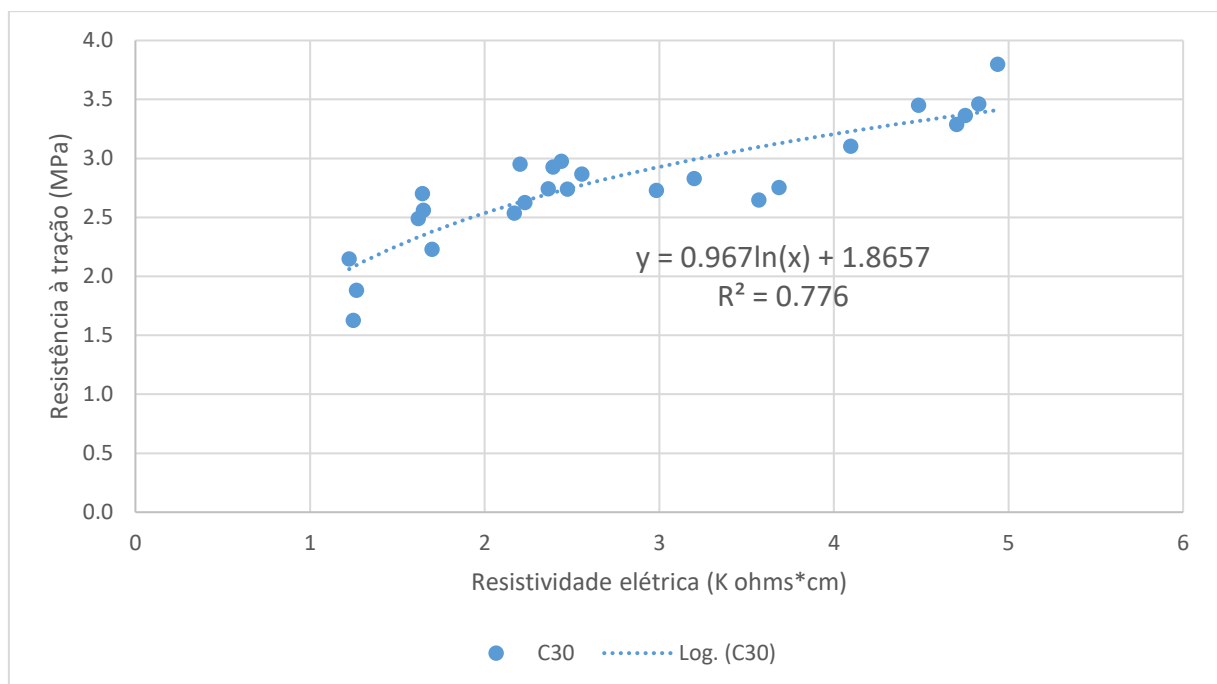


Fonte: autoria própria.

Os dados que apresentaram resíduo relativo (Re_r) maior ou igual à 20%, como também os dados visualmente distantes da curva, foram considerados suspeitos de serem “outliers”. Diante disso, foi realizada a avaliação individual de cada dado experimental, através da verificação do aumento ou diminuição do valor do r^2 , para decidir pela sua eliminação ou permanência.

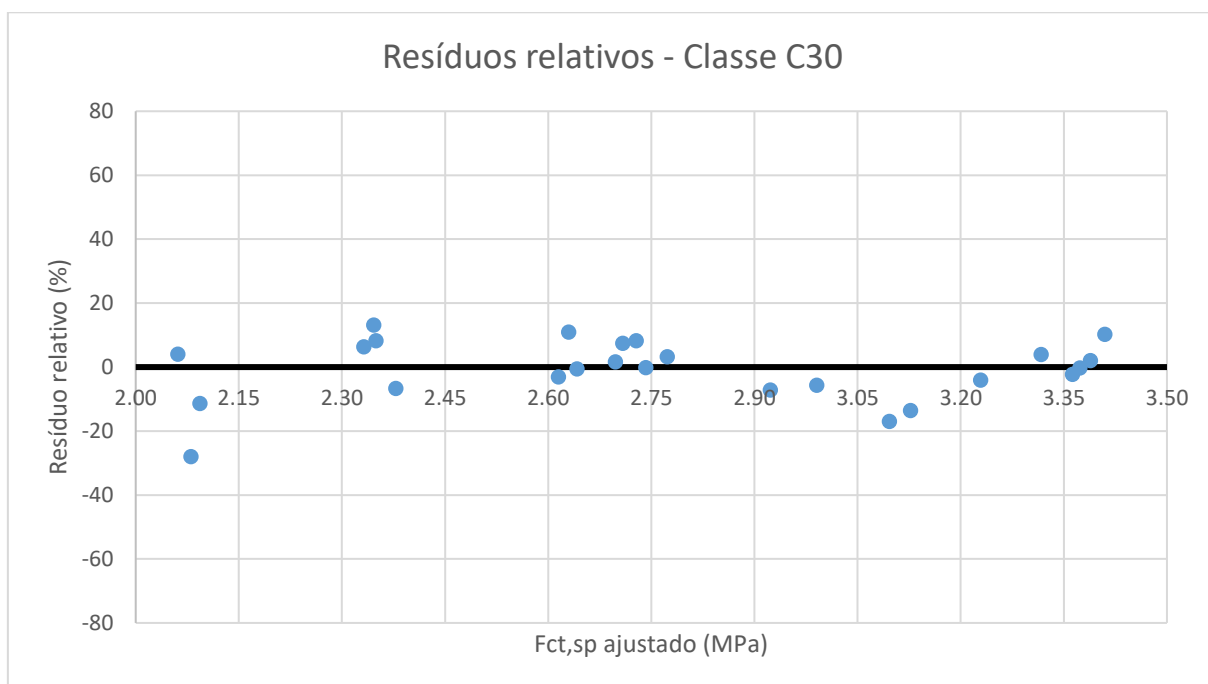
Após a eliminação dos “outliers”, as Figuras 101, 104 e 107 mostram as três novas curvas definidas para representar a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e a resistividade elétrica superficial (RES). Nas Figuras 102, 105 e 108, estão representados os novos valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados para cada classe do concreto. As Figuras 103, 106 e 109 relacionam os valores de resistência à tração medidos com os ajustados, quanto menor o ângulo formado entre a reta na cor preta com a reta de cor amarela, mais próximos são os valores medidos em relação aos ajustados, isto é, melhor a qualidade do ajuste.

Figura 101 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e RES para a classe C30



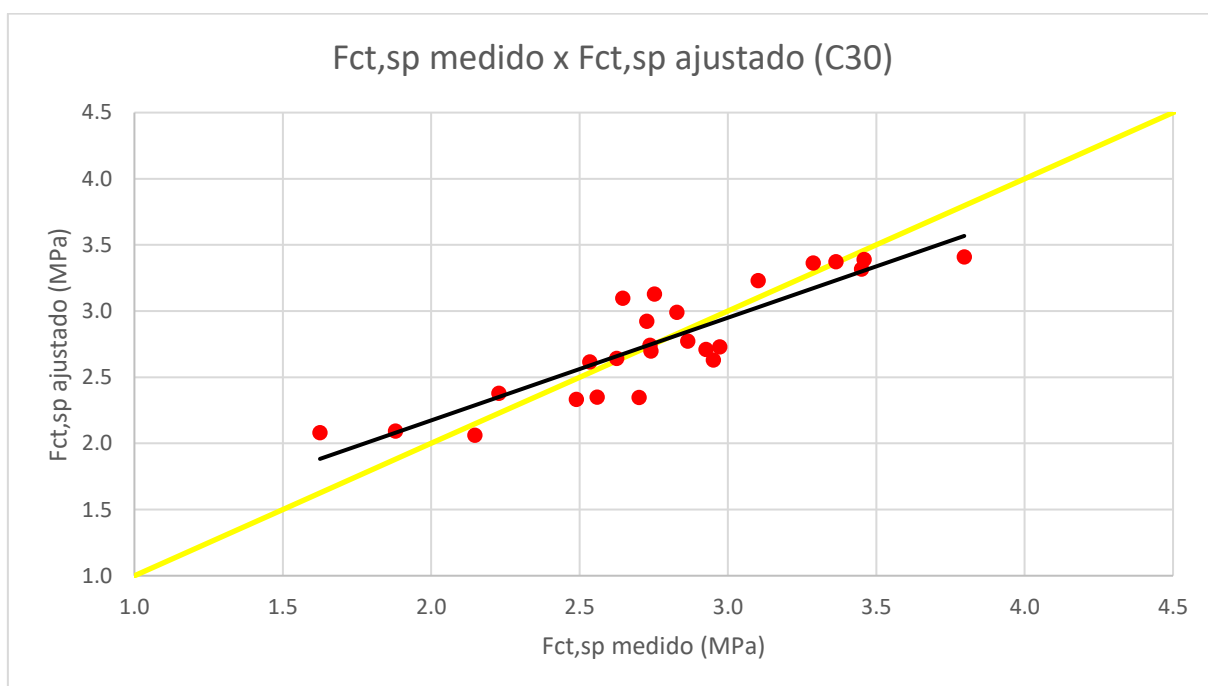
Fonte: autoria própria.

Figura 102 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C30



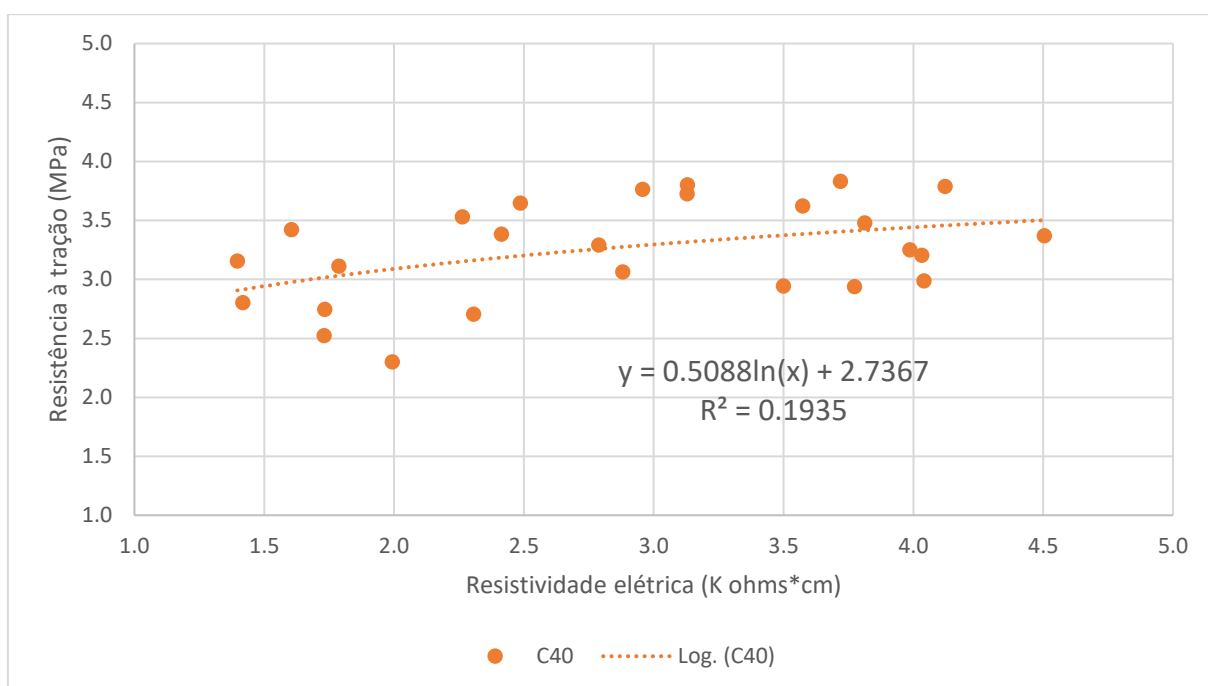
Fonte: autoria própria.

Figura 103 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C30)



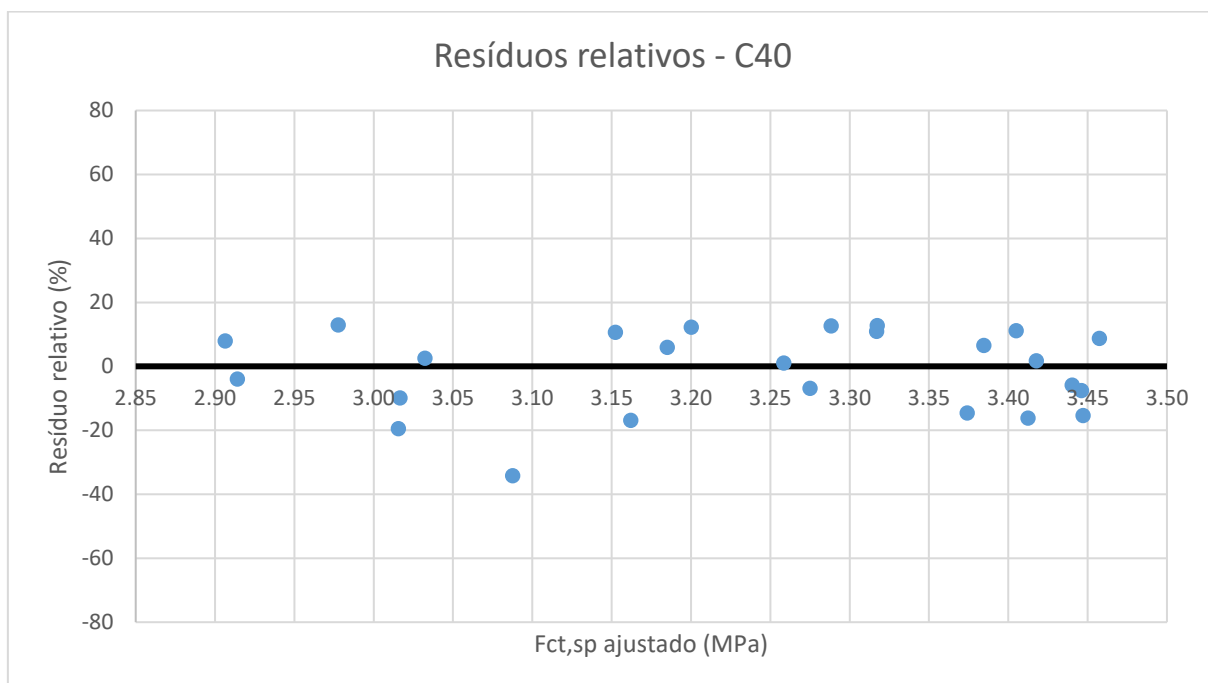
Fonte: autoria própria.

Figura 104 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e RES para a classe C40



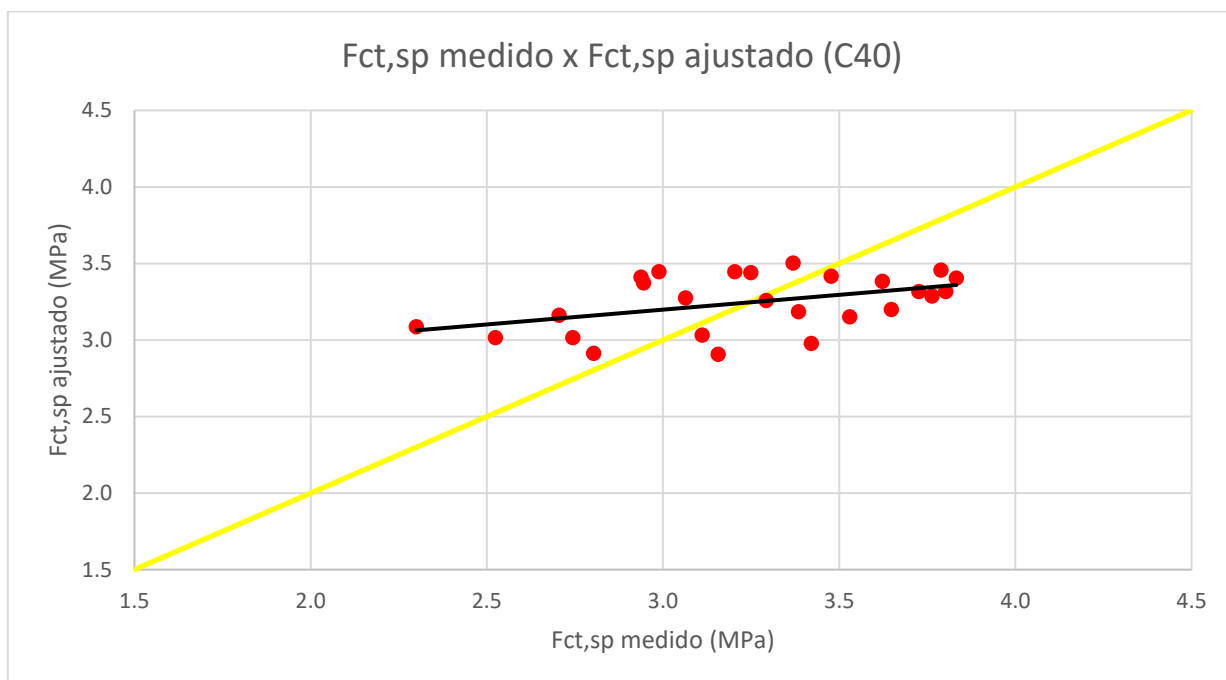
Fonte: autoria própria.

Figura 105 - Análise dos resíduos relativos entre $f_{ct,sp}$ ajustado e RES para a classe C40



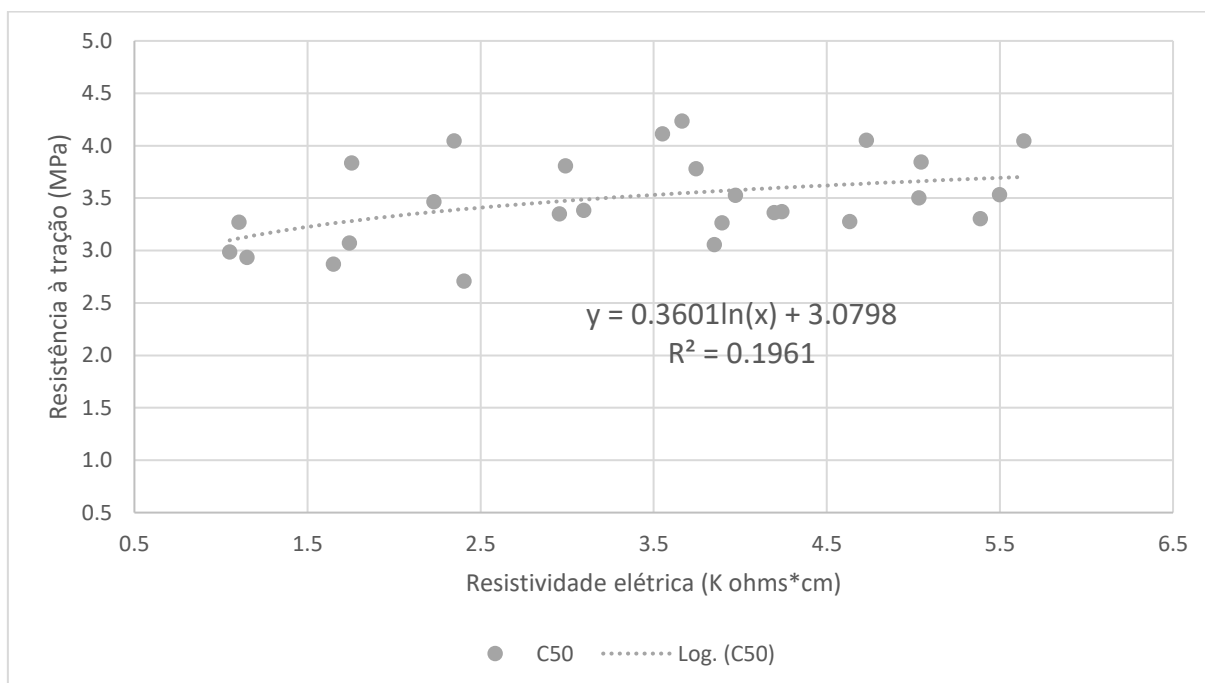
Fonte: autoria própria.

Figura 106 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C40)



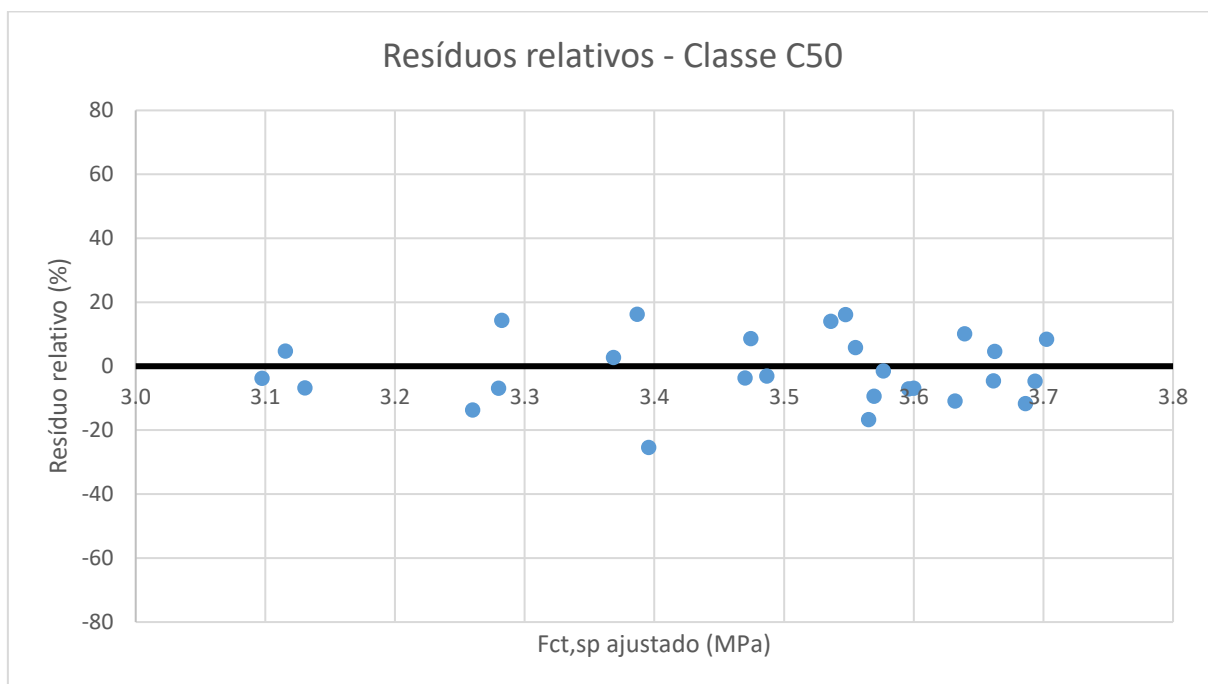
Fonte: autoria própria.

Figura 107 - Curva de correlação entre fct,sp e RES para a classe C50



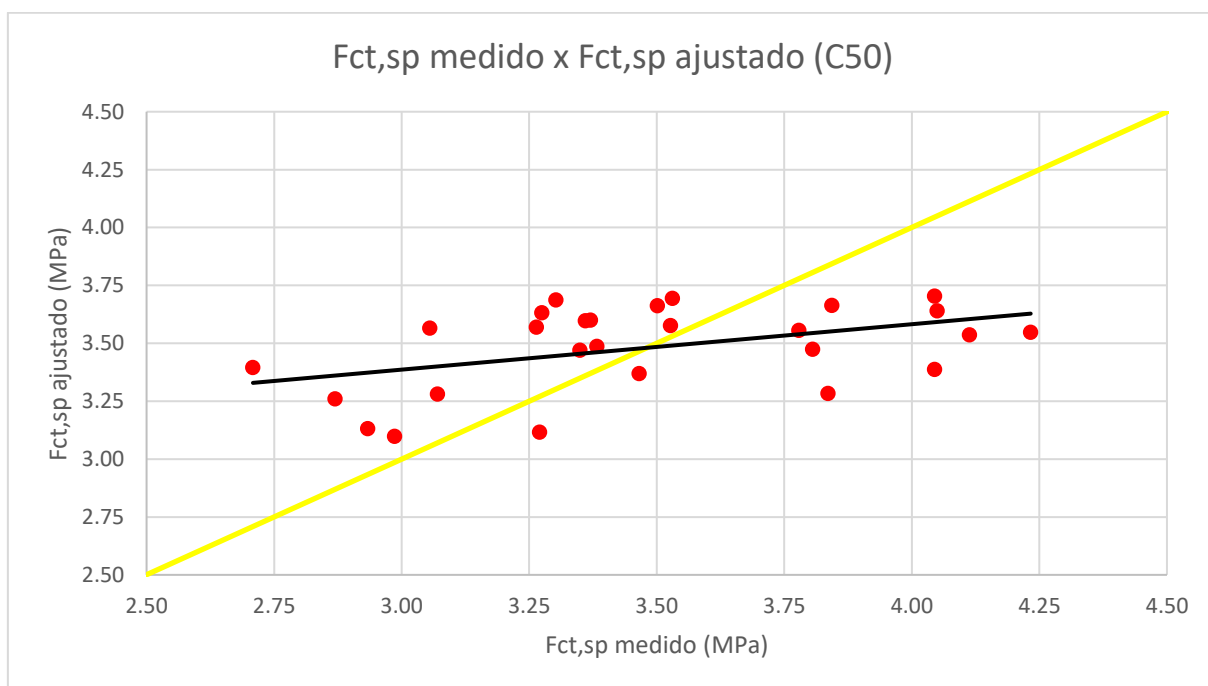
Fonte: autoria própria.

Figura 108 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES para a classe C50



Fonte: autoria própria.

Figura 109 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Classe C50)



Fonte: autoria própria.

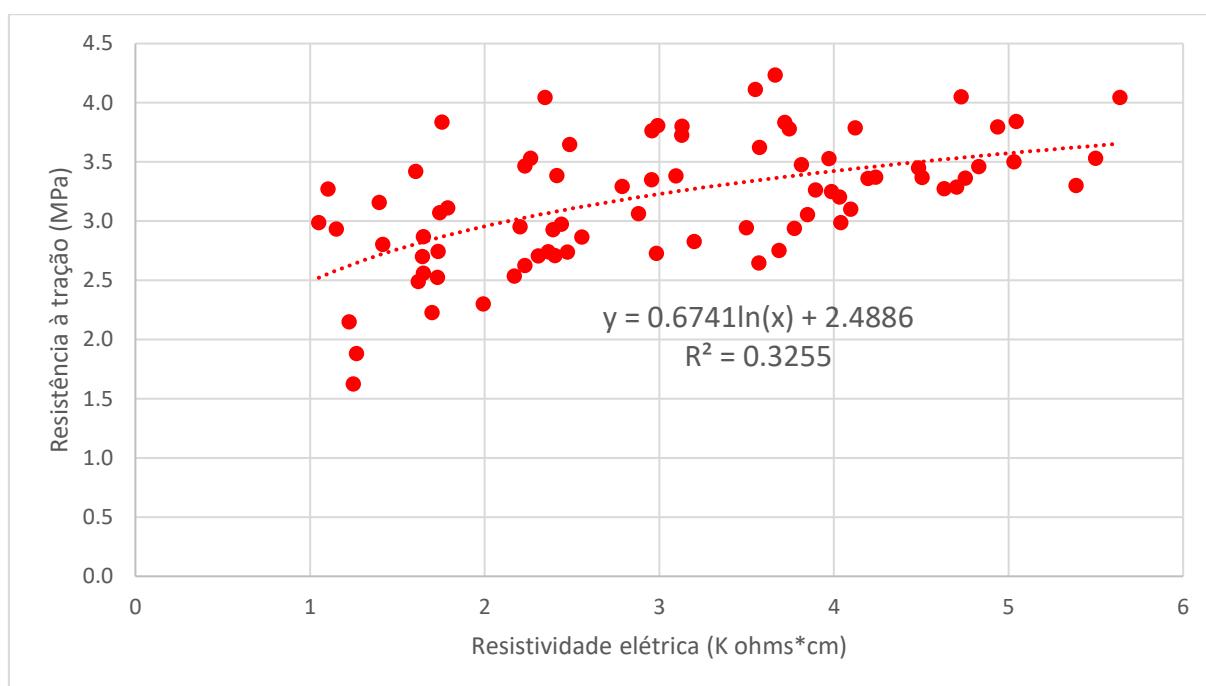
A Figura 101 evidencia uma melhora no ajustamento dos valores de resistência à tração às medidas de resistividade elétrica para a classe C30, pois o r^2 aumentou de 0,638 para 0,776, após a eliminação dos “outliers”. A mesma situação não ocorreu para as classes C40 e C50 (Figuras 104 e 107). Para a classe C40, o r^2 passou de 0,0273 para 0,1935. Para a classe C50, o r^2 passou de 0,1277 para 0,1961. Diante disso, a curva para a classe C30 apresentou médio poder de explicação para a correlação, enquanto que as curvas para as classes C40 e C50 não apresentaram correlação entre as variáveis analisadas.

A mesma interpretação pode ser realizada por meio das Figuras 103, 106 e 109, as quais permitem avaliar a qualidade do ajuste. Como pode ser visto, os ângulos formados entre a reta na cor preta com as retas de cor amarela das classes C40 e C50 são significativamente maiores do que para da classe C30, a qual apresenta um bom ajuste.

Pode ser verificado, pela análise das Figuras 102, 105 e 108, que poucos valores de resíduos relativos das classes C30, C40 e C50 estão acima de 20%. Os dados experimentais, que geraram esses resíduos, não foram eliminados para não prejudicar a respectiva curva de correlação.

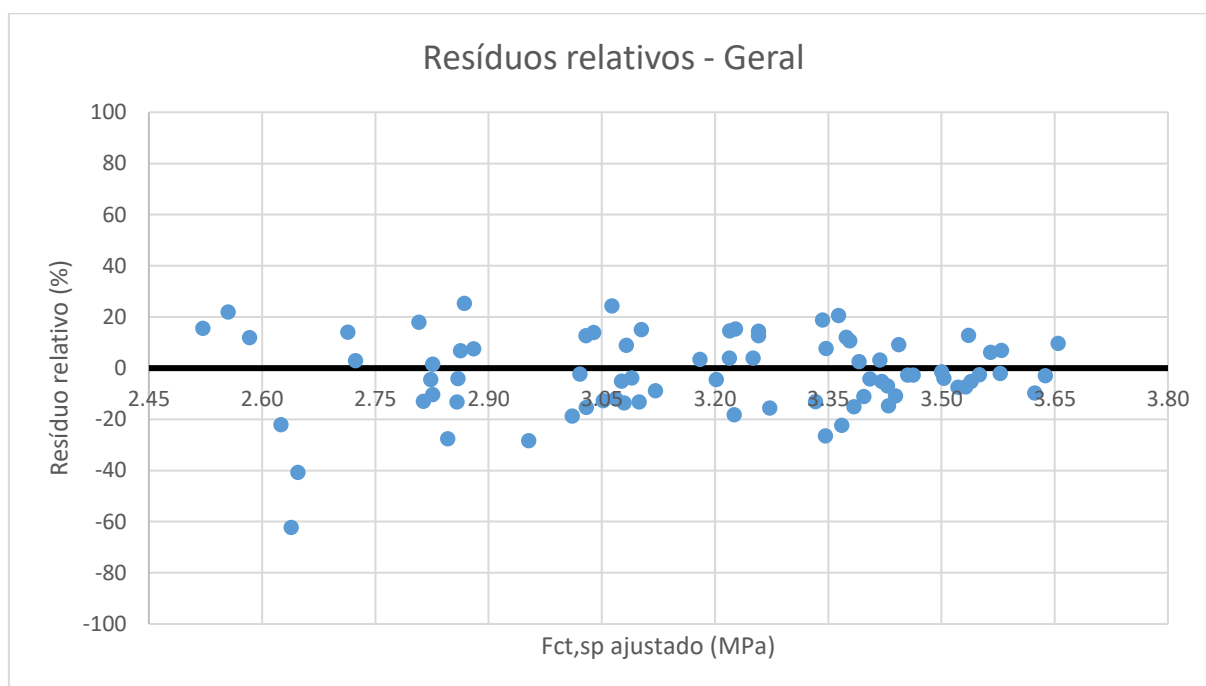
Após esta etapa, os dados experimentais remanescentes foram reunidos em um único conjunto para a determinar uma curva geral para as três classes de concreto. A Figura 110 mostra a curva geral para representar a correlação entre a resistência à tração do concreto ($f_{ct,sp}$) e a resistividade elétrica superficial (RES). Na Figura 111, estão representados os valores dos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados para o conjunto das classes.

Figura 110 - Curva de correlação geral entre fct,sp e RES



Fonte: autoria própria.

Figura 111 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RES (Geral)

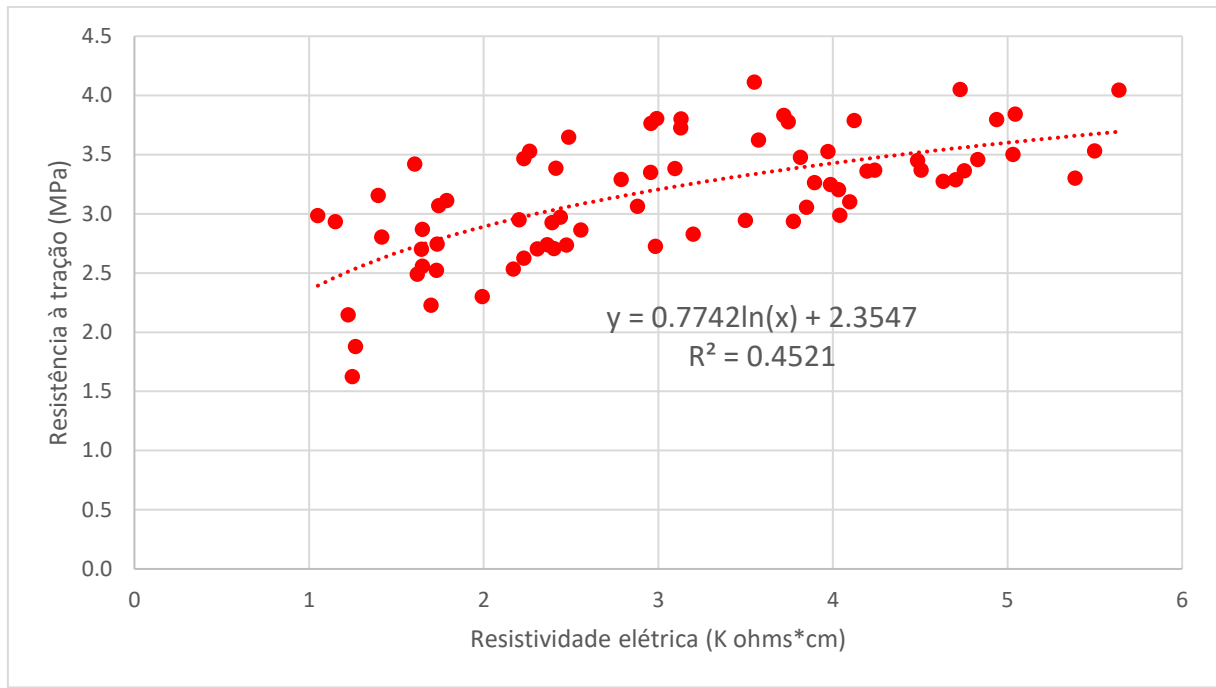


Fonte: autoria própria.

Com o intuito de melhorar o ajuste, um novo tratamento estatístico com eliminação de “outliers” foi realizado. Após essa eliminação, a Figura 112 mostra a nova curva geral que representa a correlação entre a resistência à tração do concreto (fct,sp) e

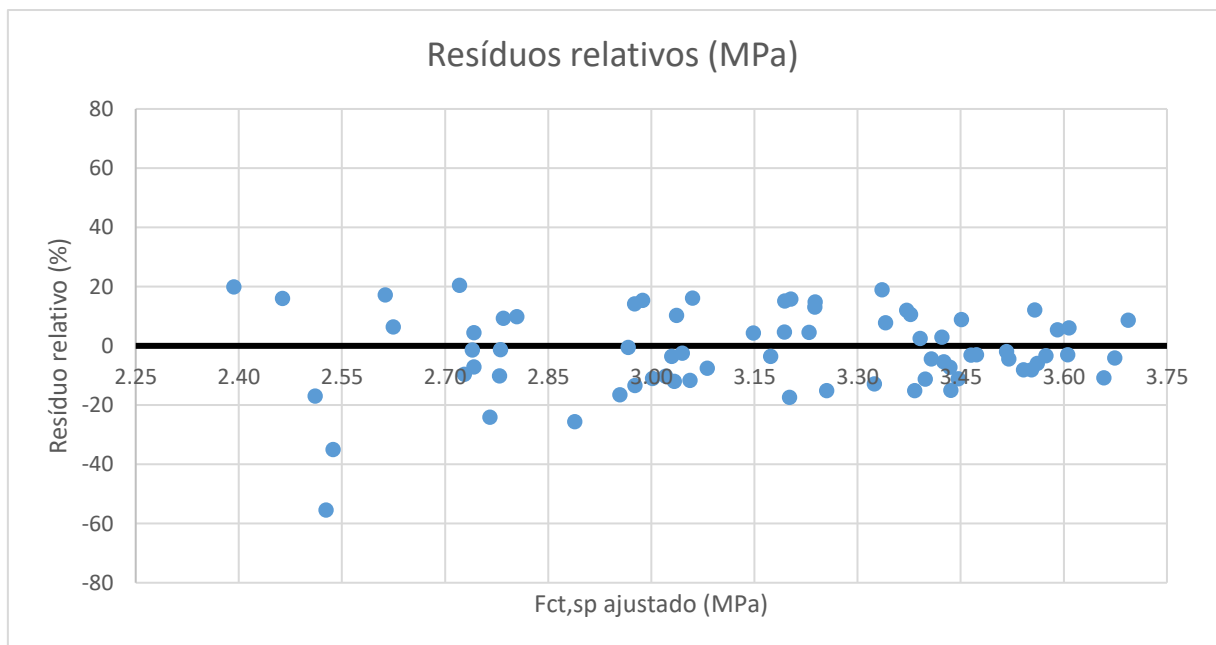
a resistividade elétrica superficial (RES). Na Figura 113, estão representados os novos resíduos relativos em relação aos valores de resistência à tração ajustados. A Figura 114 relaciona os valores de resistência à tração medidos com os ajustados.

Figura 112 - Curva de correlação geral entre fct,sp e RE



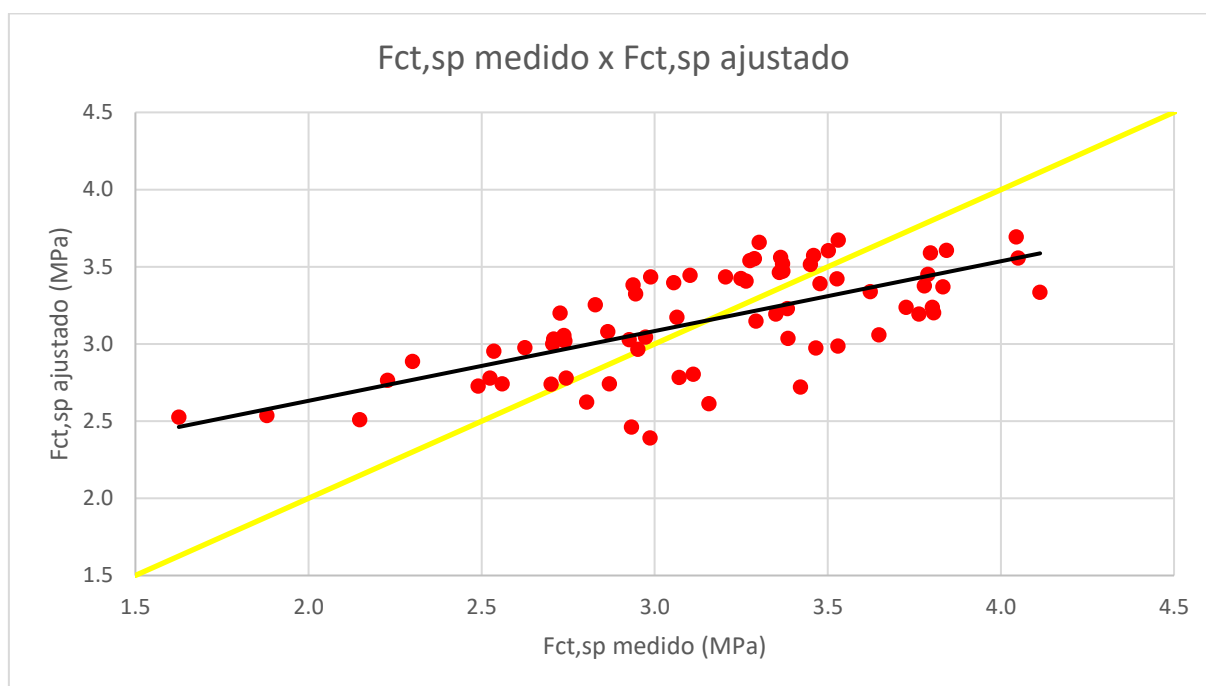
Fonte: autoria própria.

Figura 113 - Análise dos resíduos relativos entre fct,sp ajustado e RE (Geral)



Fonte: autoria própria.

Figura 114 – Relação entre os valores de resistência à tração medidos e os valores de resistência à tração ajustados (Geral)



Fonte: autoria própria.

A Tabela 15 compara os valores dos coeficientes de determinação (r^2) de todas as curvas de correlações geradas.

Tabela 15 - Coeficientes de determinação (r^2) das curvas de correlação (fct,sp x RES)

Identificação da curva	Coeficiente de determinação (r^2)
C30	0,776
C40	0,1935
C50	0,1961
Geral	0,4521*
* R^2 após segundo tratamento estatístico dos dados.	

Fonte: autoria própria.

Diante dos valores de r^2 expostos na Tabela 15, verifica-se que a curva para a classe C30 é a única que possui médio poder de explicação para a correlação fct,sp versus RE. A ausência de correlação para as classes C40 e C50, como também para a curva geral mesmo após segundo tratamento de dados, pode ser explicada através da análise dos gráficos que mostram a relação da resistência à tração com o tempo (Figuras 27 e 28 da Seção 4.2.2). Estes gráficos foram praticamente constantes para os concretos

C40-A, C50-A e C40-B, indicando possíveis problemas não identificados durante a realização dos ensaios de compressão diametral. Contudo, situação diferente ocorreu nos gráficos que mostram a relação das medidas de resistividade elétrica superficial (RES) com o tempo (Figuras 31 e 32 da Seção 4.3.2), em que todos os concretos apresentaram crescimento significativo em relação ao tempo, como era esperado para esse ensaio.

Portanto, essa pesquisa recomenda utilizar somente a curva de correlação para classe C30 quando for sabido, antecipadamente, que essa é a classe do concreto a qual se deseja estimar o valor de resistência à tração. Diante disso, a curva de correlação para a estimativa da resistência à tração, por meio da resistividade elétrica superficial, está disposta na Equação 18.

$$\text{C30:} \quad f_{ct,sp} = 0,967 \cdot \ln(\text{RES}) + 1,8657 \quad (18)$$

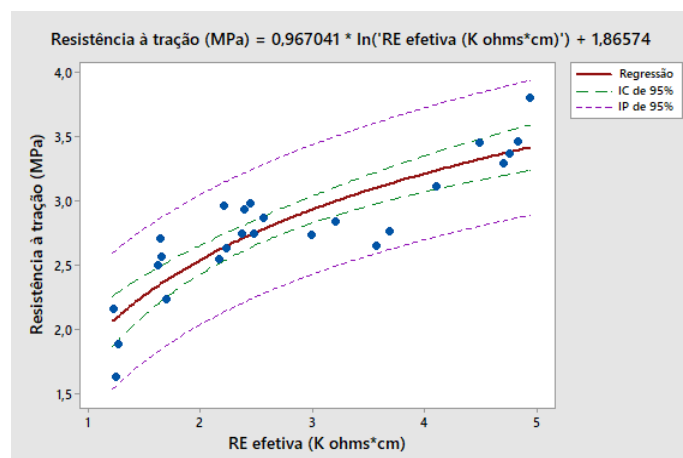
onde:

$f_{ct,sp}$ = resistência à tração em MPa;

RES = resistividade elétrica superficial corrigida pelo coeficiente de correção de geometria, valores obtidos variam entre 1 a 5 $\text{K}\Omega \cdot \text{cm}$.

Com o auxílio do programa Minitab 18, foi construída, automaticamente, a curva de correlação para a classe C30, juntamente com seus intervalos de confiança de 95% e de predição de 95% (Figura 115).

Figura 115 - Curva de correlação entre $f_{ct,sp}$ e RES para a classe C30



Fonte: autoria própria.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Essa pesquisa objetivou a obtenção de curvas de correlação entre propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão e à tração por compressão diametral) e ensaios não destrutivos (esclerometria e resistividade elétrica superficial). Foram utilizados seis concretos usinados fornecidos por duas centrais de concreto da região da grande João Pessoa – PB (Central A e Central B). De cada usina, foram recolhidos três concretos de classes diferentes (C30, C40 e C50). Ao todo foram moldados 192 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm, 90 rompidos por compressão axial (resistência à compressão), 90 rompidos por compressão diametral (resistência à tração) e 12 utilizados somente para ensaios contínuos de resistividade elétrica superficial.

Ao analisar os ensaios destrutivos individualmente, infere-se que os valores de resistência à compressão (f_c) em relação ao tempo tiveram crescimento esperado para os seis concretos fabricados com cimento do tipo CP V – ARI. Entretanto, os valores de resistência à tração ($f_{ct,sp}$) em relação ao tempo não apresentaram um aumento significativo, pois como a resistência à tração corresponde à cerca de 10% da resistência à compressão, há também pouco ganho de resistência a longo do tempo.

Ao analisar os ensaios não destrutivos individualmente, percebe-se que os índices esclerométricos médios efetivos ($IE\alpha$) em relação ao tempo tiveram um crescimento esperado para todos os concretos. O mesmo ocorreu com as medidas de resistividade elétrica superficial (RES) em relação ao tempo. Entretanto, à respeito deste último ensaio, as medidas de RES para o concreto C30-A foram maiores do que as do concreto C50-A, o que não era esperado para um concreto com menor resistência à compressão. Dessa forma, evidencia-se que o aumento na quantidade de agregado graúdo e a redução na pasta de cimento resultaram em valores mais elevados de resistividade elétrica superficial (C30-A possui 85% a mais de agregado graúdo do que o C50-A).

Com base na análise das curvas de correlação obtidas, podem ser feitas as seguintes observações:

- As curvas de correlação entre resistência à compressão e os ensaios não destrutivos apresentaram melhores ajustes em comparação com as curvas entre

resistência à tração e os ensaios não destrutivos. A inferior qualidade dos ajustes das curvas de correlação para estimar a resistência à tração foi acarretada pelos valores de resistência à tração praticamente constantes em função do tempo nos concretos C40-A, C50-A e C40-B;

- A partir do estudo da correlação entre resistência à compressão e esclerometria, foi gerada uma curva de correlação geral (independente da classe do concreto), $f_c = 0,0785 \cdot IE\alpha^{1,6697}$, a qual fornece o valor de resistência à compressão indiretamente a partir do valor de índice esclerométrico médio efetivo medido;
- A partir do estudo da correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial, foram geradas quatro curvas de correlação, sendo $f_c = 16,307\ln(\text{RES}) + 13,475$ indicada para a classe de concreto C30, $f_c = 11,993\ln(\text{RES}) + 28,211$ indicada para a classe de concreto C40, $f_c = 11,586\ln(\text{RES}) + 30,924$ indicada para a classe de concreto C50 e $f_c = 15,985\ln(\text{RES}) + 23,221$ indicada quando não for sabido, antecipadamente, a classe do concreto a qual se deseja analisar. Todas as curvas propostas fornecem o valor de resistência à compressão indiretamente a partir do valor da resistividade elétrica superficial medido;
- A partir do estudo da correlação entre resistência à tração e esclerometria, foram geradas duas curvas de correlação, sendo $f_{ct,sp} = 0,0428 \cdot IE\alpha^{1,1653}$ indicada para a classe de concreto C30 e $f_{ct,sp} = 0,1139 \cdot IE\alpha^{0,8954}$ indicada quando não for sabido, antecipadamente, a classe do concreto a qual se deseja analisar. Todas as curvas propostas fornecem o valor de resistência à tração indiretamente a partir do valor de índice esclerométrico médio efetivo medido;
- A partir do estudo da correlação entre resistência à tração e resistividade elétrica superficial, foi gerada a curva $f_{ct,sp} = 0,967 \cdot \ln(\text{RES}) + 1,8657$ para a classe de concreto C30, a qual fornece o valor de resistência à tração indiretamente a partir do valor da resistividade elétrica superficial medido.

Com relação às curvas obtidas nesta pesquisa e às encontradas na literatura para o método do esclerômetro de reflexão, verifica-se a existência de variação entre elas, entretanto, algumas são significativamente próximas entre si. Destaca-se que a curva do equipamento é bastante semelhante à curva encontrada nesta pesquisa. Diante disso, a utilização da curva do aparelho, para a estimativa da resistência à compressão de concretos, é válida para alguns casos. Todavia, para fornecer uma avaliação mais

confiável de determinado concreto, recomenda-se a utilização de curvas de correlação próprias.

A mesma comparação foi realizada para o método de resistividade elétrica superficial, verificando uma variação significativa entre as curvas obtidas nesta pesquisa e as propostas na literatura. É notório a carência de pesquisas que visam a obtenção de curva de correlação entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão do concreto.

Vale ressaltar que não foram encontradas na literatura curvas de correlação para estimar a resistência à tração do concreto, demonstrando outra carência dentro dessa temática.

Considerando os limites existentes na pesquisa, as curvas propostas podem ser utilizadas para avaliar os concretos usinados produzidos na região da grande João Pessoa-PB, com composição semelhante (cimento CP V ARI) e com valores de resistência mecânica à compressão dentro do intervalo de 30 MPa a 50 MPa aos 28 dias.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar as medidas de esclerometria e de resistividade elétrica superficial em elementos estruturas, objetivando testar as curvas de correlação obtidas neste estudo;
- Estudar a relação dos ensaios não destrutivos e propriedades mecânicas do concreto considerando diferentes tipos de cimento;
- Estudar a relação dos ensaios não destrutivos e propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho;
- Estudar a correlação entre ensaios não destrutivos e a resistência à tração na flexão;
- Estudar a correlação entre ensaios não destrutivos e o módulo de elasticidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. G. Efeito das Adições Minerais na Resistividade Elétrica de Concretos Convencionais. 1998. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ALMEIDA, I. R. Emprego do esclerômetro e do ultrassom para efeito da avaliação qualitativa dos concretos de alto desempenho. 1993. 124 f. Tese para concurso de Professor Titular - Universidade Federal Fluminense, Niterói.

ANDRADE, C.; D'ANDREA R. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. Revista ALCONPAT, v.1, n.2, p. 90 – 98, 2011.

ANDRADE, C.; D'ANDREA R.; CASTILLO A.; CASTELLOTE M. The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the durability of Reinforced Concrete. In: Non-Destructive Testing in Civil Engineering, 09. Nantes, 2009. Anais... Nantes: France, 2009.

ANDRIOLO, F. R. SGARBOZA, B. C. Inspeção e Controle de Qualidade do Concreto. São Paulo: Newswork, 1993.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. UNE 83988-2: Durabilidad del hormigón – determinación de la resistividad – Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Madrid, España, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 16605: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2017.

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

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. NBR 7584: Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 9204: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 26: Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 27: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. NBR NM 33: Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. NBR NM 46: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura dos corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2017, 30 p., 2017.

BREYSSE, D.; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. L. Assessing concrete strength with rebound hammer: review of key issues and ideas for more reliable conclusions. *Materials and Structures*, v. 47, p. 1589–1604, 2014.

British Standard Institution. BS 1881 - Part 201: Guide to the use of nondestructive methods of test for hardened concrete. London, 1986.

CÂMARA, E. Avaliação da resistência à compressão de concretos utilizados na Grande Florianópolis através de ensaios não destrutivos. 2006. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CARINO, N. J. Recent Developments in Non-destructive Testing of Concrete. *Advances in Concrete Technology*, Editor V.M. Malhotra, 2ª ed., Canadá, 1994.

CASCUDO, O. Controle da corrosão de armaduras em concreto - Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo: PINI, 1997.

CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, M. C. Standardization, to a reference of 25°C, of electrical resistivity for mortars and concretes in saturated or isolated conditions. *ACI Materials Journal*, v.99, n.2, p.385-390, 2002.

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.

CIGNA, R. *et al.* Corrosion of steel in reinforced concrete structures. COST Action 521 – Final Report. European Community. Luxembourg, 2003.

CHIES, J. A.; SILVA, B. V.; MAGALHÃES, F. C.; GIROTTI, L. S.; FILHO, L. C. P. S. Avaliação do uso do neoprene em ensaios de compressão do concreto. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55, Porto Alegre, 2013. Anais... Porto Alegre: Rio Grande do Sul, 2013.

EVANGELISTA, A. C. J. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não destrutivos. 2002. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FERREIRA, G. Estudo sobre fatores influentes nos resultados de ensaios não destrutivos em concreto endurecido. 2011. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FOCAOARU, I. Romanian Achievements in Nondestructive Strength of Concrete. In: Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP – 82, American Concrete Institute, Detroit, p.35-56. 1984

GOMES, B. M. C.; NEVES, Y. T.; DINIZ, M. I. L.; SENA, T. S. Análise das principais causas de manifestações patológicas em edificações residenciais em João Pessoa-PB: classificação e prevenção. In: Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas. Anais... Recife, Pernambuco, 2017.

GONÇALVES, A. In situ concrete strength estimation. Simultaneous use of cores, rebound hammer and pulse velocity. International Symposium NDT in Civil Engineering, Germany, p. 977-984, 1995.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 271 f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo.

HOU, T.; NGUYEN, V. K.; SU, Y.; CHEN, Y.; CHEN, P. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. Construction and Building Materials, v. 133, p. 397-408, 2017.

HUNKELER, F. The resistivity of pore water solution a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. Construction & building material, 1996.

IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures. IAEA-TCS-17, ISSN 1018-5518. Viena: IAEA, 2002.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IRRIGARAY, M. A. P. Estimativa da resistência do concreto à compressão por meio da velocidade de pulsos ultrassônicos na pasta do concreto. 2012. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LIMA, F.B.; SILVA M.F.B. Correlação entre a resistência à compressão do concreto e a sua dureza superficial. In: Congresso de Engenharia Civil. Anais IV. Ed. Interciência. Juiz de Fora, p.429-440, 2000.

LÜBECK, A.; GASTALDINI, A.L.G.; BARIN, D.S.; SIQUEIRA, H.C. Compressive strength and electrical properties of concrete with white Portland cement and blast-furnace slag. Cement & Concrete Composites, v. 34, p. 392–399, 2012.

MACHADO, M. D. Curvas de correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos. 2005. 265 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MALHOTRA, V. M. In Situ / Nondestructive Testing of Concrete – A Global Review. In: Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Special Publication SP – 82, American Concrete Institute, Detroit, p.1–16, 1984.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. 2. ed. Flórida: CRC Press, 2004.

MARTINS, G. A.; DOMINGUES, O. Estatística geral e aplicada. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MEDEIROS, M. H. F. Estudo de variáveis que influenciam nas medidas de resistividade de estruturas de concreto armado. Revista engenharia civil, Universidade de Minho, v. 12, p. 55-64, 2001.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Estudo da resistividade do concreto para proposta de modelagem de vida útil – corrosão das armaduras devido à penetração de cloretos. 2014. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

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. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MOHAMAD, G.; CARMO, P. I. O.; OLIVEIRA, M. J. D.; TEMP, A. L. Métodos combinados para a avaliação da resistência de concretos. *Revista Matéria*, p. 83-99, 2015.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

OLIVEIRA, E. C. Comparação das diferentes técnicas para a exclusão de “outliers”. In: ENQUALAB - Congresso da Qualidade em Metrologia. Anais... São Paulo, 2008.

PALÁCIOS, M. D. P. G. Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto. 2012. 165 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Distrito Federal.

POLDER, R.; ANDRADE, C.; ELSENER, B.; VENNESLAND, Ø.; GULIKERS, J.; WEIDERT R.; RAUPACH M. RILEM TC 154-EMC: Test methods for on site measurement of resistivity of concrete. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, v. 33, p. 603-611, 2000.

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

QUADROS, P. A. Estudo das correlações entre as propriedades mecânicas do concreto. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gérias, Belo Horizonte.

RAPHAEL, J. M. Tensile Strength of Concrete. *ACI Journal*, v.81, n.2, p. 158-165, 1984.

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

REPETTE, W. L. Contribuição a inspeção e a avaliação da segurança de estruturas acabadas de concreto armado. 1991. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RODRIGUES, G. S. S. Módulo de Deformação Estática do Concreto pelo Método Ultra-sônico: Estudo da Correlação e Fatores Influentes. 2003. Doutorado (Tese) - Universidade Federal de Goiás, Goiás.

SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

SENGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 434-441, 2014.

SILVA, F. R. Uma abordagem para detecção de “outliers” em dados categóricos. 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Instituto de computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, F. T.; PIMENTEL, R. L.; BARBOSA, N. P. Análise de patologias em estruturas de edificações da cidade de João Pessoa. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 45, Vitória, 2003. Anais... Vitória: Espirito Santo, 2003.

SILVA, T. J.; FERREIRA, G.; DIAS, J. F. Influência de variáveis nos resultados de ensaios não destrutivos em estruturas de concreto armado. *Science & Engineering Journal*, v. 22, p. 103-113, 2013.

SOSHIRODA, T.; VORAPUTHAPORN, K. Recommended method for earlier inspection of concrete quality by non-destructive testing. *Concrete durability and repair technology*, p.27-36, 1999.

VERMA, S. K.; BHADARIA, S. S.; AKHTAR, S. Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures. *Journal of Construction Engineering*, v. 2013, 11 p., 2013.

WEI, X.; XIAO, L.; LI, Z. Prediction of standard compressive strength of cement by the electrical resistivity measurement. *Construction and Building Materials*, v. 31, p. 341–346, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Quadro A.1 - Resultados de resistência à compressão para os concretos de classe C30

C30			
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à compressão (MPa)
A	3 dias	CP 3	28,78
		CP 4	26,74
	7 dias	CP 7	34,38
		CP 8	35,40
	28 dias	CP 11	32,09
		CP 12	37,11
	90 dias	CP 23	33,06
		CP 16	37,16
		CP 20	33,47
	120 dias	CP 22	38,45
CP 24		39,42	
CP 26		35,03	
B	3 dias	CP 1	11,09
		CP 6	13,44
		CP 3	13,95
	7 dias	CP 9	22,50
		CP 11	24,12
		CP 12	23,41
	28 dias	CP 15	26,63
		CP 17	28,15
		CP 18	25,57
	90 dias	CP 22	25,42
		CP 23	26,68
		CP 24	24,85
120 dias	CP 28	22,24	
	CP 30	23,64	
	CP 31	23,14	

Quadro A.2 - Resultados de resistência à compressão para os concretos de classe C40

C40			
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à compressão (MPa)
A	3 dias	CP 3	33,06

		CP 2	36,57
		CP 5	33,20
	7 dias	CP 14	39,88
		CP 11	40,78
		CP 13	42,41
	28 dias	CP 15	46,51
		CP 16	37,71
		CP 18	42,48
	90 dias	CP 23	39,02
		CP 24	39,22
		CP 26	38,33
	120 dias	CP 28	44,28
		CP 30	39,57
		CP 32	41,70
B	3 dias	CP 5	32,80
		CP 4	29,66
		CP 2	28,23
	7 dias	CP 9	35,71
		CP 10	32,77
		CP 11	37,10
	28 dias	CP 15	47,11
		CP 16	45,23
		CP 17	45,25
	90 dias	CP 21	40,91
		CP 30	41,73
		CP 31	43,68
	120 dias	CP 35	42,14
		CP 38	45,19
		CP 41	44,11

Quadro A.3 - Resultados de resistência à compressão para os concretos de classe C50

C50			
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à compressão (MPa)
A	3 dias	CP 1	43,40
		CP 2	36,14
		CP 3	38,65
	7 dias	CP 9	45,50
		CP 10	42,36
		CP 13	40,93
	28 dias	CP 19	49,49
		CP 17	47,63
		CP 20	53,00

B	90 dias	CP 21	46,32
		CP 24	50,67
		CP 25	50,36
	120 dias	CP 28	47,83
		CP 29	49,71
		CP 32	48,16
	3 dias	CP 1	33,49
		CP 2	26,68
		CP 5	30,67
	7 dias	CP 12	42,59
		CP 13	40,01
		CP 10	43,74
	28 dias	CP 18	48,26
		CP 20	54,71
		CP 15	42,61
	90 dias	CP 21	48,16
		CP 23	49,07
		CP 26	47,23
	120 dias	CP 27	42,24
		CP 29	47,42
		CP 28	48,32

Quadro A.4 – Resultados de resistência à compressão média para os concretos da Central de concreto A

Idade (dias)	C30-A		C40-A		C50-A	
	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)
3	27,76	1,44	34,27	1,99	39,40	3,69
7	34,89	0,72	41,03	1,28	42,93	2,34
28	34,60	3,55	44,49	2,85	50,04	2,73
90	34,57	2,26	38,86	0,47	49,12	2,43
120	37,63	2,31	41,85	2,36	48,57	1,01

Quadro A.5 – Resultados de resistência à compressão média para os concretos da Central de concreto B

Idade (dias)	C30-B		C40-B		C50-B	
	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)
3	12,83	1,53	30,23	2,34	30,28	3,42
7	23,34	0,81	35,19	2,21	42,11	1,91

28	26,78	1,30	45,86	1,08	48,53	6,06
90	25,65	0,94	42,11	1,42	48,15	0,92
120	23,01	0,71	43,81	1,55	47,87	0,64

APÊNDICE B - RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Quadro B.1 - Resultados de resistência à tração para os concretos de classe C30

C30			
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à tração (MPa)
A	3 dias	CP 1	3,18
		CP 2	2,23
	7 dias	CP 9	2,74
		CP 10	2,86
	28 dias	CP 13	2,50
		CP 14	3,10
	90 dias	CP 17	2,75
		CP 15	3,36
		CP 19	3,46
	120 dias	CP 21	3,80
		CP 31	3,29
		CP 25	3,45
B	3 dias	CP 2	1,63
		CP 5	2,15
		CP 4	1,88
	7 dias	CP 14	2,56
		CP 10	2,70
		CP 13	2,49
	28 dias	CP 20	2,95
		CP 16	2,63
		CP 19	2,74
	90 dias	CP 21	2,54
		CP 25	2,97
		CP 26	2,93
	120 dias	CP 7	2,65
		CP 27	2,73
		CP 32	2,83

Quadro B.2 - Resultados de resistência à tração para os concretos de classe C40

C40

Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à tração (MPa)
A	3 dias	CP 6	3,53
		CP 1	2,30
		CP 4	2,52
	7 dias	CP 9	3,38
		CP 12	2,71
		CP 10	3,65
	28 dias	CP 17	4,28
		CP 20	3,29
		CP 19	3,06
	90 dias	CP 21	2,99
		CP 22	3,25
		CP 25	2,94
	120 dias	CP 27	2,54
		CP 29	2,94
		CP 31	3,20
B	3 dias	CP 6	3,87
		CP 1	3,16
		CP 8	2,80
	7 dias	CP 14	2,74
		CP 13	3,11
		CP 12	3,42
	28 dias	CP 18	3,73
		CP 19	3,80
		CP 20	3,76
	90 dias	CP 33	3,37
		CP 32	3,79
		CP 37	2,54
	120 dias	CP 34	3,62
		CP 39	3,48
		CP 42	3,83

Quadro B.3 - Resultados de resistência à tração para os concretos de classe C50

C50			
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à tração (MPa)
A	3 dias	CP 4	3,47
		CP 5	4,04
		CP 6	2,71
	7 dias	CP 11	3,38
		CP 12	3,81
		CP 14	3,35

B	28 dias	CP 18	3,53
		CP 15	2,74
		CP 16	3,78
	90 dias	CP 22	3,06
		CP 23	3,36
		CP 26	3,26
	120 dias	CP 27	3,84
		CP 30	4,04
		CP 31	3,30
	3 dias	CP 3	2,99
		CP 4	2,93
		CP 6	3,27
	7 dias	CP 11	3,84
		CP 14	3,07
		CP 9	2,87
	28 dias	CP 16	4,11
		CP 17	4,23
		CP 19	4,42
	90 dias	CP 22	3,50
		CP 24	3,53
		CP 25	3,28
	120 dias	CP 30	4,05
		CP 31	2,85
		CP 32	3,37

Quadro B.4 – Resultados de resistência à tração média para os concretos da Central de concreto A

Idade (dias)	C30-A		C40-A		C50-A	
	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)
3	2,71	0,68	2,78	0,65	3,41	0,67
7	2,80	0,09	3,25	0,49	3,51	0,25
28	2,80	0,42	3,55	0,65	3,65	0,18
90	3,19	0,38	3,06	0,17	3,23	0,16
120	3,51	0,26	2,89	0,34	3,73	0,38

Quadro B.5 – Resultados de resistência à tração média para os concretos da Central de concreto B

Idade (dias)	C30-B		C40-B		C50-B	
	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Desvio padrão (MPa)

3	1,88	0,26	3,28	0,54	3,06	0,18
7	2,58	0,11	3,09	0,34	3,26	0,51
28	2,77	0,17	3,76	0,04	4,25	0,15
90	2,81	0,24	3,23	0,63	3,44	0,14
120	2,73	0,09	3,64	0,18	3,42	0,60

**APÊNDICE C – ÍNDICES ESCLEROMÉTRICOS MÉDIOS EFETIVOS (IE_{α})
PARA A CONSTRUÇÃO DAS CURVAS IE_{α} VERSUS IDADE**

Quadro C.1 – Média dos índices esclerométricos médios efetivos obtidos para os corpos de prova rompidos à compressão axial e compressão diametral para o concreto C30-A

C30					
Central de concreto	Idade	Nº CP	Índice esclerométrico médio (Ie)	Índice esclerométrico médio efetivo (Ieα)	Média - Índice esclerométrico médio efetivo (Ieα)
A - 1	3 dias	CP 3	26,58	28,24	29,85
		CP 4	29,60	31,45	
A - 2		CP 1	26,58	28,24	
		CP 2	29,60	31,45	
A - 1	7 dias	CP 7	23,63	25,10	26,05
		CP 8	24,33	25,85	
A - 2		CP 9	25,13	26,69	
		CP 10	25,00	26,56	
A - 1	28 dias	CP 11	26,30	27,94	32,46
		CP 12	30,75	32,67	
A - 2		CP 13	29,82	31,68	
		CP 14	35,36	37,56	
A - 1	90 dias	CP 23	33,63	35,72	34,35
		CP 16	35,58	37,80	
		CP 20	32,09	34,09	
A - 2		CP 17	31,89	33,88	
		CP 15	33,00	35,06	
		CP 19	27,79	29,52	
A - 1	120 dias	CP 22	38,46	40,86	39,85
		CP 24	38,78	41,20	
		CP 26	36,44	38,72	
A - 2		CP 21	38,21	40,60	
		CP 31	36,75	39,04	
		CP 25	36,40	38,67	

Quando C.2 – Média dos índices esclerométricos médios efetivos obtidos para os corpos de prova rompidos à compressão axial e compressão diametral para o concreto C40-A

C40					
Central de concreto	Idade	Nº CP	Índice esclerométrico médio (Ie)	Índice esclerométrico médio efetivo (Ie α)	Média - Índice esclerométrico médio efetivo (Ie α)
A - 1	3 dias	CP 3	34,40	36,55	37,12
		CP 2	35,08	37,27	
CP 5		35,23	37,43		
A - 2		CP 6	35,00	37,18	
		CP 1	35,10	37,29	
		CP 4	34,80	36,97	
A - 1	7 dias	CP 14	37,80	40,16	40,88
		CP 11	38,31	40,70	
CP 13		39,46	41,92		
A - 2		CP 9	39,21	41,66	
		CP 12	37,62	39,96	
		CP 10	38,46	40,86	
A - 1	28 dias	CP 16	38,80	41,22	42,20
		CP 15	41,31	43,89	
CP 18		40,36	42,88		
A - 2		CP 17	40,64	43,18	
		CP 20	39,00	41,43	
		CP 19	38,23	40,62	
A - 1	90 dias	CP 23	43,18	45,88	43,75
		CP 24	40,92	43,47	
CP 26		40,55	43,08		
A - 2		CP 21	40,90	43,45	
		CP 22	40,56	43,09	
		CP 25	41,00	43,56	
A - 1	120 dias	CP 28	42,50	45,15	45,32
		CP 30	41,33	43,91	
CP 32		43,00	45,68		
A - 2		CP 27	44,10	46,85	
		CP 29	41,09	43,66	
		CP 31	43,90	46,64	

Quadro C.3 – Média dos índices esclerométricos médios efetivos obtidos para os corpos de prova rompidos à compressão axial e compressão diametral para o concreto C50-A

C50

Central de concreto	Idade	Nº CP	Índice esclerométrico médio (Ie)	Índice esclerométrico médio efetivo (Ie _α)	Média - Índice esclerométrico médio efetivo (Ie _α)
A - 1	3 dias	CP 1	36,00	38,25	37,75
A - 2		CP 2	35,00	37,18	
		CP 3	35,00	37,18	
		CP 4	35,00	37,18	
		CP 5	35,20	37,40	
		CP 6	37,00	39,31	
A - 1	7 dias	CP 9	41,40	43,98	42,50
A - 2		CP 10	39,57	42,04	
		CP 13	39,80	42,28	
		CP 11	39,11	41,55	
		CP 12	39,36	41,82	
		CP 14	40,78	43,32	
A - 1	28 dias	CP 19	44,21	46,97	47,29
A - 2		CP 17	43,83	46,57	
		CP 20	45,00	47,81	
		CP 15	45,00	47,81	
		CP 18	44,82	47,62	
		CP 16	44,20	46,96	
A - 1	90 dias	CP 21	45,83	48,69	50,07
A - 2		CP 24	45,36	48,20	
		CP 25	48,56	51,59	
		CP 22	46,90	49,83	
		CP 23	48,80	51,85	
		CP 26	47,30	50,25	
A - 1	120 dias	CP 28	43,89	46,63	49,14
A - 2		CP 29	47,89	50,88	
		CP 32	45,23	48,05	
		CP 27	45,43	48,26	
		CP 30	47,42	50,38	
		CP 31	47,64	50,61	

Quadro C.4 – Média dos índices esclerométricos médios efetivos obtidos para os corpos de prova rompidos à compressão axial e compressão diametral para o concreto C30-B

C30					
Central de concreto	Idade	Nº CP	Índice esclerométrico médio (Ie)	Índice esclerométrico médio efetivo (Ieα)	Média - Índice esclerométrico médio efetivo (Ieα)
B - 1	3 dias	CP 1	25,43	27,02	26,91
		CP 6	25,00	26,56	

		CP 3	24,67	26,21	
		CP 2	25,75	27,36	
B - 2		CP 5	26,78	28,45	
		CP 4	24,33	25,85	
B - 1	7 dias	CP 9	27,78	29,51	30,27
		CP 11	27,50	29,22	
		CP 12	27,25	28,95	
		CP 14	30,33	32,23	
B - 2		CP 10	29,33	31,16	
		CP 13	28,78	30,57	
B - 1	28 dias	CP 15	34,23	36,37	36,62
		CP 17	35,75	37,98	
		CP 18	34,13	36,26	
		CP 20	34,54	36,69	
B - 2		CP 16	34,38	36,53	
		CP 19	33,75	35,86	
B - 1	90 dias	CP 22	35,50	37,72	37,92
		CP 23	35,00	37,18	
		CP 24	35,09	37,28	
		CP 21	37,78	40,14	
B - 2		CP 25	36,36	38,63	
		CP 26	34,40	36,55	
B - 1	120 dias	CP 28	37,50	39,84	40,04
		CP 30	36,67	38,96	
		CP 31	37,27	39,60	
		CP 7	37,64	39,99	
B - 2		CP 27	37,40	39,73	
		CP 32	39,67	42,14	

Quadro C.5 – Média dos índices esclerométricos médios efetivos obtidos para os corpos de prova rompidos à compressão axial e compressão diametral para o concreto C40-B

C40					
Central de concreto	Idade	Nº CP	Índice esclerométrico médio (Ie)	Índice esclerométrico médio efetivo (Ieα)	Média - Índice esclerométrico médio efetivo (Ieα)
B - 1	3 dias	CP 5	30,00	31,87	29,39
		CP 4	27,33	29,04	
		CP 2	30,80	32,72	
B - 2		CP 6	27,00	28,69	
		CP 1	22,86	24,28	
		CP 8	28,00	29,75	
B - 1	7 dias	CP 9	32,75	34,79	32,33

		CP 10	29,82	31,68	
		CP 11	30,75	32,67	
B - 2		CP 14	31,00	32,93	
		CP 13	27,50	29,22	
		CP 12	30,75	32,67	
B - 1	28 dias	CP 15	32,75	34,79	34,74
		CP 16	32,00	34,00	
CP 17		32,75	34,79		
B - 2		CP 18	32,20	34,21	
		CP 19	35,11	37,30	
		CP 20	31,40	33,36	
B - 1	90 dias	CP 21	39,17	41,61	42,65
		CP 30	39,92	42,41	
CP 31		42,10	44,73		
B - 2		CP 33	41,00	43,56	
		CP 32	38,58	40,99	
		CP 37	40,13	42,63	
B - 1	120 dias	CP 35	42,14	44,77	44,16
		CP 38	41,63	44,22	
CP 41		40,91	43,46		
B - 2		CP 34	42,45	45,10	
		CP 39	40,86	43,41	
		CP 42	41,38	43,97	

Quadro C.6 – Média dos índices esclerométricos médios efetivos obtidos para os corpos de prova rompidos à compressão axial e compressão diametral para o concreto C50-B

C50					
Central de concreto	Idade	Nº CP	Índice esclerométrico médio (Ie)	Índice esclerométrico médio efetivo (Ie α)	Média - Índice esclerométrico médio efetivo (Ie α)
B - 1	3 dias	CP 1	35,46	37,67	37,46
		CP 2	35,00	37,18	
		CP 5	34,87	37,04	
B - 2		CP 3	35,80	38,03	
		CP 4	35,07	37,26	
		CP 6	35,36	37,56	
B - 1	7 dias	CP 12	37,57	39,92	39,81
		CP 13	38,57	40,98	
		CP 10	36,62	38,90	
B - 2		CP 11	36,64	38,92	
		CP 14	38,50	40,90	
		CP 9	36,93	39,23	

B - 1	28 dias	CP 18	43,08	45,77	44,04
		CP 20	40,11	42,61	
		CP 15	41,70	44,30	
B - 2		CP 16	41,25	43,82	
		CP 17	41,21	43,79	
		CP 19	41,38	43,96	
B - 1	90 dias	CP 21	42,54	45,19	45,14
		CP 23	41,75	44,36	
		CP 26	43,50	46,22	
B - 2		CP 22	41,15	43,72	
		CP 24	43,18	45,88	
		CP 25	42,78	45,45	
B - 1	120 dias	CP 27	42,80	45,47	46,74
		CP 29	45,27	48,10	
		CP 28	42,46	45,11	
B - 2		CP 30	45,55	48,39	
		CP 31	44,08	46,83	
		CP 32	43,80	46,53	

APÊNDICE D – MEDIDAS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL (RE) PARA A CONSTRUÇÃO DAS CURVAS RE VERSUS IDADE

Quadro D.1 – Valores médios de resistividade elétrica superficial (RE) obtidos continuamente nos mesmos corpos de prova para os concretos da Centrais de concreto A e B, corrigidos pelo coeficiente de correção da geometria

MÉDIA			
Identificação	Idade (dias)	Média - Resistividade elétrica (K ohms*cm)	
C30-A	3	1,81	0,42
	7	2,84	0,78
	28	4,54	1,18
	90	4,60	1,88
	120	6,23	1,10
C40-A	3	1,92	0,25
	7	2,51	0,56
	28	2,99	0,82
	90	4,02	0,59
	120	3,84	1,02
C50-A	3	2,38	0,10
	7	2,92	0,16
	28	3,96	0,07
	90	4,46	0,42
	120	6,47	0,84

C30-B	3	1,29	0,12
	7	1,72	0,09
	28	2,41	0,01
	90	2,58	0,02
	120	3,60	0,09
C40-B	3	1,35	0,02
	7	1,67	0,01
	28	3,27	0,24
	90	4,29	0,09
	120	3,73	0,13
C50-B	3	1,12	0,04
	7	1,80	0,11
	28	3,62	0,08
	90	5,36	0,51
	120	4,84	0,07

APÊNDICE E - VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO ASSOCIADOS AOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Quadro E.1 – Resultados de resistência à compressão associados aos resultados de ensaios não destrutivos ajustados (multiplicados pelo coeficiente de correção da geometria e pelo coeficiente de correção do índice esclerométrico) para a classe C30, após eliminação pelo Teste de Chauvenet

C30							
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à compressão (MPa)	Resistividade elétrica efetiva (K ohms*cm)		Índice esclerométrico médio efetivo (I _{ea})	
A	3 dias	CP 3	28,78	1,93	0,23	28,24	1,39
		CP 4	26,74	1,70	0,22	31,45	1,54
B		CP 1	11,09	1,29	0,10	27,02	1,35
		CP 6	13,44	1,38	0,14	26,56	1,50
		CP 3	13,95	1,23	0,09	26,21	0,92
A	7 dias	CP 7	34,38	2,63	0,18	25,10	1,38
		CP 8	35,40	2,81	0,23	25,85	0,92
B		CP 9	22,50	1,57	0,05	29,51	1,97
		CP 11	24,12	1,53	0,14	29,22	1,61
		CP 12	23,41	1,57	0,14	28,95	1,24
A	28 dias	CP 11	32,09	4,78	0,15	27,94	0,72
		CP 12	37,11	4,37	0,63	32,67	1,86
B		CP 15	26,63	2,23	0,21	36,37	2,30
		CP 17	28,15	2,18	0,23	37,98	2,03
		CP 18	25,57	2,49	0,13	36,26	1,70
A		CP 23	33,06	3,52	0,30	35,72	1,34

B	90 dias	CP 16	37,16	3,96	0,31	37,80	1,39
		CP 20	33,47	3,78	0,65	34,09	1,68
		CP 22	25,42	2,43	0,15	37,72	2,38
		CP 23	26,68	2,32	0,16	37,18	2,02
		CP 24	24,85	2,35	0,19	37,28	2,30
A	120 dias	CP 22	38,45	5,23	0,60	40,86	1,82
		CP 24	39,42	4,61	0,54	41,20	1,48
		CP 26	35,03	4,64	0,48	38,72	1,69
B		CP 28	22,24	2,73	0,24	39,84	2,03
		CP 30	23,64	2,78	0,21	38,96	1,84
		CP 31	23,14	2,92	0,31	39,60	1,65

Quadro E.2 – Resultados de resistência à compressão associados aos resultados de ensaios não destrutivos ajustados (multiplicados pelo coeficiente de correção da geometria e pelo coeficiente de correção do índice esclerométrico) para a classe C40, após eliminação pelo Teste de Chauvenet

C40							
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à compressão (MPa)	Resistividade elétrica efetiva (K ohms*cm)		Índice esclerométrico médio efetivo (I _{ea})	
A	3 dias	CP 3	33,06	1,94	0,20	36,55	2,14
		CP 2	36,57	2,11	0,19	37,27	1,86
		CP 5	33,20	1,97	0,12	37,43	1,38
B		CP 5	32,80	1,36	0,13	31,87	0,87
		CP 4	29,66	1,33	0,10	29,04	0,61
		CP 2	28,23	1,39	0,08	32,72	1,90
A	7 dias	CP 14	39,88	2,23	0,14	40,16	1,62
		CP 11	40,78	2,43	0,26	40,70	1,91
		CP 13	42,41	2,49	0,12	41,92	2,59
B		CP 9	35,71	1,62	0,06	34,79	1,58
		CP 10	32,77	1,63	0,08	31,68	1,56
		CP 11	37,10	1,56	0,09	32,67	1,86
A	28 dias	CP 15	46,51	3,59	0,28	43,89	2,14
		CP 18	42,48	3,39	0,39	42,88	1,89
B		CP 15	47,11	3,26	0,27	34,79	2,99
		CP 16	45,23	3,07	0,30	34,00	2,38
		CP 17	45,25	2,97	0,23	34,79	1,68
A	90 dias	CP 23	39,02	4,02	0,46	45,88	2,55
		CP 24	39,22	3,24	0,20	43,47	2,29
		CP 26	38,33	4,31	0,51	43,08	1,74
B		CP 21	40,91	4,50	0,43	41,61	2,30
		CP 30	41,73	4,04	0,20	42,41	1,89
		CP 31	43,68	4,07	0,26	44,73	1,62

A	120 dias	CP 28	44,28	3,30	0,61	45,15	2,20
		CP 30	39,57	3,59	0,27	43,91	1,99
		CP 32	41,70	4,19	0,57	45,68	2,76
B		CP 35	42,14	3,80	0,24	44,77	2,73
		CP 38	45,19	3,75	0,28	44,22	1,96
		CP 41	44,11	3,65	0,25	43,46	2,20

Quadro E.3 – Resultados de resistência à compressão associados aos resultados de ensaios não destrutivos ajustados (multiplicados pelo coeficiente de correção da geometria e pelo coeficiente de correção do índice esclerométrico) para a classe C50, após eliminação pelo Teste de Chauvenet

C50							
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à compressão (MPa)	Resistividade elétrica efetiva (K ohms*cm)		Índice esclerométrico médio efetivo (I _{ea})	
A	3 dias	CP 1	43,40	2,30	0,11	38,25	1,73
		CP 2	36,14	2,29	0,13	37,18	2,83
		CP 3	38,65	2,25	0,07	37,18	1,84
B		CP 1	33,49	1,06	0,12	37,67	1,66
		CP 2	26,68	1,12	0,04	37,18	1,80
		CP 5	30,67	1,07	0,07	37,04	2,04
A	7 dias	CP 9	45,50	2,98	0,16	43,98	1,60
		CP 10	42,36	2,83	0,25	42,04	2,44
		CP 13	40,93	2,63	0,21	42,28	2,11
B		CP 12	42,59	1,82	0,13	39,92	1,80
		CP 13	40,01	1,78	0,09	40,98	2,07
		CP 10	43,74	1,69	0,09	38,90	1,71
A	28 dias	CP 19	49,49	3,89	0,23	46,97	2,71
		CP 17	47,63	3,69	0,24	46,57	2,07
		CP 20	53,00	3,79	0,22	47,81	2,60
B		CP 18	48,26	3,85	0,43	45,77	1,72
		CP 20	54,71	3,58	0,27	42,61	2,40
		CP 15	42,61	3,43	0,19	44,30	2,30
A	90 dias	CP 21	46,32	3,80	0,28	48,69	2,96
		CP 24	50,67	3,93	0,29	48,20	2,44
		CP 25	50,36	4,00	0,25	51,59	1,08
B		CP 21	48,16	5,42	0,87	45,19	3,12
		CP 23	49,07	5,63	0,55	44,36	1,93
		CP 26	47,23	4,54	0,51	46,22	1,96
A	120 dias	CP 28	47,83	4,99	0,44	46,63	3,58
		CP 29	49,71	4,90	0,32	50,88	1,95
		CP 32	48,16	5,07	0,43	48,05	2,26

B	CP 29	47,42	4,73	0,34	48,10	2,56
	CP 28	48,32	4,50	0,27	45,11	2,11

APÊNDICE F - VALORES DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ASSOCIADOS AOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Quadro F.1 – Resultados de resistência à tração associados aos resultados de ensaios não destrutivos ajustados (multiplicados pelo coeficiente de correção da geometria e pelo coeficiente de correção do índice esclerométrico) para a classe C30, após eliminação pelo Teste de Chauvenet

C30							
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à tração (MPa)	Resistividade elétrica (K ohms*cm)		Índice esclerométrico médio efetivo (I _{ea})	
A	3 dias	CP 1	3,18	1,93	0,23	28,24	1,39
		CP 2	2,23	1,70	0,22	31,45	1,54
B		CP 2	1,63	1,25	0,03	27,36	1,68
		CP 5	2,15	1,22	0,09	28,45	1,03
		CP 4	1,88	1,27	0,06	25,85	1,50
A	7 dias	CP 9	2,74	2,48	0,23	26,69	0,89
		CP 10	2,86	2,56	0,12	26,56	0,98
B		CP 14	2,56	1,65	0,10	32,23	0,92
		CP 10	2,70	1,64	0,07	31,16	1,46
		CP 13	2,49	1,62	0,12	30,57	1,82
A	28 dias	CP 13	2,50	3,95	0,30	31,68	2,01
		CP 14	3,10	4,10	0,54	37,56	1,94
B		CP 20	2,95	2,20	0,25	36,69	1,92
		CP 16	2,63	2,23	0,24	36,53	1,76
		CP 19	2,74	2,36	0,29	35,86	1,98
A	90 dias	CP 17	2,75	3,69	0,35	33,88	0,83
		CP 15	3,36	4,75	0,35	35,06	2,67
		CP 19	3,46	4,83	0,42	29,52	1,73
B		CP 21	2,54	2,17	0,12	40,14	1,03
		CP 25	2,97	2,44	0,22	38,63	1,66
		CP 26	2,93	2,39	0,17	36,55	2,26
A	120 dias	CP 21	3,80	4,94	0,33	40,60	2,47
		CP 31	3,29	4,70	0,63	39,04	1,68
		CP 25	3,45	4,49	0,71	38,67	1,60
B		CP 7	2,65	3,57	0,23	39,99	2,48
		CP 27	2,73	2,98	0,39	39,73	2,25
		CP 32	2,83	3,20	0,39	42,14	1,72

Quadro F.2 – Resultados de resistência à tração associados aos resultados de ensaios não destrutivos ajustados (multiplicados pelo coeficiente de correção da geometria e

pelo coeficiente de correção do índice esclerométrico) para a classe C40, após eliminação pelo Teste de Chauvenet

C40							
Central de concreto	Idade	Nº CP	Resistência à tração (MPa)	Resistividade elétrica (K ohms*cm)		Índice esclerométrico médio efetivo (I _{ea})	
A	3 dias	CP 6	3,53	2,26	0,14	37,18	1,84
		CP 1	2,30	1,99	0,12	37,29	1,37
		CP 4	2,52	1,73	0,16	36,97	2,11
B		CP 6	3,87	1,30	0,08	28,69	1,06
		CP 1	3,16	1,40	0,18	24,28	1,14
		CP 8	2,80	1,42	0,13	29,75	0,00
A	7 dias	CP 9	3,38	2,41	0,16	41,66	2,17
		CP 12	2,71	2,31	0,13	39,96	1,19
		CP 10	3,65	2,49	0,17	40,86	1,27
B		CP 14	2,74	1,73	0,11	32,93	2,54
		CP 13	3,11	1,79	0,13	29,22	1,39
		CP 12	3,42	1,61	0,12	32,67	0,53
A	28 dias	CP 17	4,28	3,12	0,40	43,18	2,45
		CP 20	3,29	2,79	0,16	41,43	1,96
		CP 19	3,06	2,88	0,18	40,62	2,04
B		CP 18	3,73	3,13	0,33	34,21	2,18
		CP 19	3,80	3,13	0,25	37,30	2,78
		CP 20	3,76	2,96	0,19	33,36	0,95
A	90 dias	CP 21	2,99	4,04	0,40	43,45	2,26
		CP 22	3,25	3,99	0,33	43,09	2,38
		CP 25	2,94	3,77	0,51	43,56	2,06
B		CP 33	3,37	4,51	0,41	43,56	2,12
		CP 32	3,79	4,12	0,44	40,99	2,37
		CP 37	2,54	4,10	0,22	42,63	0,89
A	120 dias	CP 27	2,54	3,59	0,30	46,85	1,69
		CP 29	2,94	3,50	0,31	43,66	1,81
		CP 31	3,20	4,03	0,28	46,64	1,17
B		CP 34	3,62	3,57	0,31	45,10	2,35
		CP 39	3,48	3,81	0,22	43,41	2,24
		CP 42	3,83	3,72	0,32	43,97	2,36

Quadro F.2 – Resultados de resistência à tração associados aos resultados de ensaios não destrutivos ajustados (multiplicados pelo coeficiente de correção da geometria e pelo coeficiente de correção do índice esclerométrico) para a classe C50, após eliminação pelo Teste de Chauvenet

C50

Central de concreto	Ida de	Nº CP	Resistência à tração (MPa)	Resistividade elétrica (K ohms*cm)		Índice esclerométrico médio efetivo (I_{ea})	
A	3 dias	CP 4	3,47	2,23	0,13	37,18	2,43
		CP 5	4,04	2,35	0,13	37,40	1,57
		CP 6	2,71	2,40	0,09	39,31	2,30
B		CP 3	2,99	1,05	0,12	38,03	1,67
		CP 4	2,93	1,15	0,07	37,26	1,68
		CP 6	3,27	1,10	0,05	37,56	2,07
A	7 dias	CP 11	3,38	3,10	0,23	41,55	2,22
		CP 12	3,81	2,99	0,11	41,82	2,70
		CP 14	3,35	2,96	0,12	43,32	1,48
B		CP 11	3,84	1,76	0,08	38,92	1,97
		CP 14	3,07	1,74	0,12	40,90	2,03
		CP 9	2,87	1,65	0,14	39,23	1,58
A	28 dias	CP 18	3,53	3,97	0,26	47,62	2,46
		CP 16	3,78	3,74	0,17	46,96	1,99
B		CP 16	4,11	3,55	0,20	43,82	2,13
		CP 17	4,23	3,66	0,26	43,79	2,09
		CP 19	4,42	3,38	0,31	43,96	2,29
A	90 dias	CP 22	3,06	3,85	0,36	49,83	0,93
		CP 23	3,36	4,20	0,24	51,85	2,28
		CP 26	3,26	3,89	0,41	50,25	1,59
B		CP 22	3,50	5,03	0,63	43,72	2,52
		CP 24	3,53	5,50	0,53	45,88	2,41
		CP 25	3,28	4,63	0,42	45,45	2,04
A	120 dias	CP 27	3,84	5,04	0,34	48,26	2,36
		CP 30	4,04	5,64	0,33	50,38	2,19
		CP 31	3,30	5,39	0,37	50,61	1,97
B		CP 30	4,05	4,73	0,41	48,39	1,98
		CP 31	2,85	4,66	0,45	46,83	2,06
		CP 32	3,37	4,24	0,37	46,53	2,11