



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



DEODATO JORGE MATOS MARIATA

USO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DE DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO

Uberlândia, 2023

DEODATO JORGE MATOS MARIATA

**USO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DE
DORMENTES DE CONCRETO PROTENDIDO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Uberlândia, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

M333u Mariata, Deodato Jorge Matos, 1988-
2023 O ensino superior de educação física em Goiás [recurso eletrônico] :
 uso de ensaios não destrutivos na avaliação de dormentes de concreto
 protendido / Deodato Jorge Matos Mariata. - 2023.

 Orientador: Antonio Carlos dos Santos.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

 Modo de acesso: Internet.

 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.7111>

 Inclui bibliografia.

 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia civil. I. Santos, Antonio Carlos dos., (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624

Glória Aparecida
Bibliotecária Documentalista - CRB-6/2047



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 295, PPGEC				
Data:	29 de setembro de 2023	Hora de início:	14:10 h	Hora de encerramento:	16:15 h
Matrícula do Discente:	12112ECV027				
Nome do Discente:	Deodato Jorge Matos Mariata				
Título do Trabalho:	Uso de ensaios não destrutivos na avaliação de dormentes de concreto protendido				
Área de concentração:	Construção Civil, Estruturas e Geotecnia				
Linha de pesquisa:	Estruturas				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Durabilidade e Avaliação Estrutural				

Reuniu-se, em sessão pública por webconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Luiz Carlos de Almeida - UNICAMP, Paulo Roberto Cabana Guterres - UFU e Antonio Carlos dos Santos, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Antonio Carlos dos Santos, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Antônio Carlos dos Santos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/09/2023, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Cabana Guterres, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/09/2023, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos de Almeida, Usuário Externo**, em 29/09/2023, às 17:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4735892** e o código CRC **2961D696**.

Dedico este trabalho à meus queridos pais.

RESUMO

Nas últimas duas décadas notou-se um aumento de manifestações patológicas em dormentes de concreto, o que têm reduzido a vida útil destes em situação de utilização, levando-os à ruptura e o aumento do custo operacional das ferrovias. Para controlar estes problemas, inspeções costumam ser feitas de forma visual por inspetores, resultando num trabalho difícil, demorado e que dificulta a tomada de decisão dos técnicos envolvidos, devido à subjetividade do processo. Nesta pesquisa propôs-se o uso de ensaios não destrutivos como método alternativo para tais inspeções de modo a trazer dados quantitativos e correlação com a situação real do dormente. Assim em ambiente de laboratório, em função do fabricante, condições de exposição, idade e cidade de fabricação, os dormentes foram organizados em 09 (nove) grupos totalizando 107 dormentes. Nestes, foram realizados os ensaios de dureza superficial, ultrassom, módulo dinâmico por ultrassom, resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão da armadura, tomografia por ultrassom e georadar (GPR). Os resultados mostraram que a técnica de tomografia por ultrassom e georadar, não são muito indicadas para inspeção de dormentes; a técnica de esclerometria por si só não foi capaz de detetar quaisquer variabilidades das propriedades dos dormentes. Os ensaios de ultrassom, resistividade elétrica superficial, módulo dinâmico por ultrassom e potencial de corrosão mostraram-se promissores na avaliação de dormentes em ambiente de laboratório. As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples. Foram testados diferentes tipos de regressões tais como: linear, polinomial e de potência. Em todos os ensaios, a curva que melhor se ajustou em função do coeficiente de determinação R^2 , foi a polinomial de segundo grau, pois apresentou maiores valores em relação às demais. Ainda assim, as curvas de correlação encontradas não foram semelhantes a apresentados por diversos autores.

Palavra-chave: Dormentes, Ensaio não destrutivo, Estruturas de concreto, Durabilidade.

ABSTRACT

In the last two decades, there has been an increase in pathological manifestations in concrete sleepers, which have reduced their useful life in a situation of use, leading them to rupture and increasing the operational cost of railways. In order to control these problems, inspections are usually carried out visually by inspectors, resulting in a difficult and time-consuming job that makes decision-making difficult for the technicians involved due to the subjectivity of the process. In this research, the use of non-destructive tests was proposed as an alternative method for such inspections in order to bring quantitative data and correlation with the real situation of the sleeper. Thus, in a laboratory environment, depending on the manufacturer, exposure conditions, age and city of manufacture, the sleepers were organized into 09 (nine) groups, totaling 107 sleepers. In these, tests were performed on surface hardness, ultrasound, ultrasonic dynamic modulus, surface electrical resistivity, reinforcement corrosion potential, ultrasound tomography and GPR. The results showed that the technique of tomography by ultrasound and georadar are not very suitable for inspection of sleepers; the sclerometry technique alone was not able to detect any variability in the sleeper properties. Ultrasound, surface electrical resistivity, ultrasonic dynamic modulus and corrosion potential tests have shown to be promising in the evaluation of sleepers in a laboratory environment. Correlation curves were plotted using simple regression. Different types of regressions were tested, such as: linear, polynomial and power. In all tests, the curve that best fitted the coefficient of determination R^2 was the second-degree polynomial, as it presented greater values in relation to the others. Even so, the correlation curves found were not similar to those presented by several authors.

Keywords: Sleepers, Non-destructive testing, Concrete structures, Durability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de uma via permanente tradicional.....	26
Figura 2. Tipos de dormentes ferroviários	27
Figura 3. Deterioração do dormente de madeira devido à decomposição fúngica.....	28
Figura 4. Rachadura lateral do dormente de madeira.....	29
Figura 5. Rachadura lateral do dormente de madeira.....	29
Figura 6. Dormentes de aço: a) tipo comum; b) em forma de Y.....	30
Figura 7. Corrosão em dormente de aço.....	30
Figura 8. Dormente de polímero a) e b)	31
Figura 9. Tipos de dormentes de concreto.....	32
Figura 10. Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado	33
Figura 11. Dormentes fissurados após fabricação	34
Figura 12. Falha do dormente de concreto devido à abrasão no local do trilho	35
Figura 13. Rachaduras na região do assento do trilho do dormente.....	35
Figura 14. Dormentes danificados por descarrilamento	36
Figura 15. Dormentes danificados por carregamento de alto impacto	37
Figura 16. Fissuras em dormentes de concreto devido a RAA	38
Figura 17. Rachadura do dormente de concreto protendido por DEF.....	39
Figura 18. Trinca cônica devido ao ciclo de gelo e degelo	40
Figura 19. Fissuras típicas em dormentes de concreto protendido.....	41
Figura 20. Ondas de compressão (onda P)	44
Figura 21. Ondas cisalhantes (onda S)	44
Figura 22. Esquema de funcionamento do ultrassom.....	45
Figura 23. Tipos de transmissão no ensaio de ultrassom	46
Figura 24. Relação entre a velocidade de ultrassom e a idade do concreto	47
Figura 25. Evolução da velocidade ultrassônica dos corpos de prova ao longo da idade	48
Figura 26. Relação entre a velocidade de ultrassom e idade do concreto	49
Figura 27. Influência dos aditivos super plastificantes na velocidade de ultrassom	50
Figura 28. Influência das adições na velocidade de ultrassom aos 91 dias.....	51
Figura 29. Velocidade de ultrassom de concretos com diferentes tipos de agregados.....	54
Figura 30. Armaduras na posição perpendicular à propagação da onda	55
Figura 31. Armaduras na posição paralela à propagação da onda.....	57
Figura 32. Velocidade da onda em concretos com armadura na direção paralela.....	59

Figura 33. Correlação entre velocidade da onda e teor de umidade.....	60
Figura 34. Correlação entre a velocidade da onda e a absorção por capilaridade.....	61
Figura 35. Relação entre a velocidade da onda ultrassônica e temperatura	62
Figura 36. Efeito do modo de cura na velocidade de ultrassom.....	64
Figura 37. Efeito do modo de cura na velocidade de ultrassom.....	65
Figura 38. Correlação entre velocidade de ultrassom e resistência a compressão	66
Figura 39. Resistência à compressão através da velocidade de ultrassom	66
Figura 40. Padrão de falha da viga ensaiada na carga máxima	68
Figura 41. Mapeamento da velocidade da onda em diferentes níveis de danos.....	69
Figura 42: Avaliação de rachaduras e delaminações com tomografia ultrassônica.	69
Figura 43. Arranjo dos transdutores para medição do tempo com trinca centrada	70
Figura 44. Arranjo dos transdutores para medição do tempo com trinca centrada	71
Figura 45. Estimativa da profundidade de fissuras	72
Figura 46. Esquema de funcionamento do esclerômetro.....	73
Figura 47. Índice esclerométrico Q para diferentes profundidades de carbonatação	75
Figura 48. Variação do índice esclerométrico em função da profundidade de carbonatação ..	75
Figura 49. Índice esclerométrico e dias de cura	76
Figura 50. Média do Índice esclerométrico e dias de cura de cada espécimes.....	77
Figura 51. Influência da relação água-cimento no índice esclerométrico	79
Figura 52. Influência da relações água-cimento no índice esclerométrico.....	79
Figura 53. Influência da umidade no índice esclerométrico.....	80
Figura 54. Relação entre a resistência à compressão de cubos de concreto e esclerometria...	81
Figura 55. Relação entre a resistência à compressão aos 84 dias e índice esclerométrico.....	81
Figura 56. Princípio de funcionamento pelo método Wenner.....	83
Figura 57. Resistividade normalizada (<i>NR</i>) em função do conteúdo de agregado	85
Figura 58. Efeito do tamanho e teor de agregado na resistividade elétrica	85
Figura 59. Efeito do tipo de agregado na resistividade elétrica.....	86
Figura 60. Efeito do teor de pasta de cimento e o teor de agregado na resistividade elétrica..	86
Figura 61. Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica para a/c: a) 0,4; b) 0,5 e c) 0,6	87
Figura 62. Efeito da relação água-cimento na resistividade elétrica do concreto.	88
Figura 63. Resistividade elétrica do concreto e relação água-cimento em diferentes idades...	89
Figura 64. Resistividade elétrica do concreto: a) posicionamento da sonda em relação à armadura; b) Resultados da medição em paralelo; c) Resultados da medição em diferentes ângulos.....	90

Figura 65. Resistividade elétrica do concreto: a) posicionamento em paralelo do equipamento; b) resultado da medição	91
Figura 66. Resistividade elétrica do concreto: a) posicionamento perpendicular do equipamento; b) resultado da medição	92
Figura 67. Resistividade elétrica de amostras saturadas carbonatadas e não carbonatadas.	94
Figura 68. Resistividade elétrica de amostras com e sem armadura à diferentes níveis de carbonatação	94
Figura 69. Efeito das condições de umidade na resistividade elétrica	95
Figura 70. Relação entre resistividade e teor relativo de água de amostras através de processos de absorção de umidade e secagem	96
Figura 71: Gráfico de contorno mostrando a distribuição da resistividade elétrica.	97
Figura 72: Mapa das condições do tabuleiro da ponte pelo método da resistividade elétrica..	97
Figura 73. Esquema de medição do potencial de corrosão.....	98
Figura 74. Relação entre o valor do potencial e teor de umidade	100
Figura 75. Correlação entre o potencial de corrosão e o teor de umidade	101
Figura 76. Potencial de corrosão de acordo com o recobrimento para $w/c = 0,5$	102
Figura 77. Influência da espessura do recobrimento sobre o potencial de corrosão com $a/c=0,43$; $0,50$ e $0,59$ – sem cloreto	102
Figura 78. Relação entre valor do potencial e teor do cloreto	103
Figura 79. Influência da contaminação por cloretos sobre o potencial de corrosão com $a/c=0,43$; $0,50$ e $0,59$ – cobertura = 3 cm	104
Figura 80. Potencial de corrosão em amostras expostas ao ambiente de dióxido de carbono para mesma relação água-cimento de $0,4$	105
Figura 81. Mapeamento de potencial de corrosão da superfície da estrutura: (a) antes do reparo e (b) 30 dias após reparo.....	106
Figura 82. Mapa de potencial de meia célula (mV), para painel nervurado.....	106
Figura 83. Funcionamento de uma antena de GPR	107
Figura 84. Higienização dos dormentes	108
Figura 85. Identificação dos dormentes por QR Code	109
Figura 86. Organograma dos grupos de dormentes sob estudo.....	109
Figura 87. Variáveis de estudo	111
Figura 88: Divisão do dormente em seção para a realização dos ensaios não destrutivos.....	111
Figura 89 : Marcação das armaduras	112
Figura 90: Disposição dos impactos do ensaio de esclerometria	112

Figura 91: Esquema das etapas do ensaio de esclerometria (a-d)	113
Figura 92: Esquema das etapas do ensaio de ultrassom	114
Figura 93: Esquema da posição dos transdutores em cada seção para realização do ensaio de ultrassom.....	114
Figura 94: Esquema para realização do ensaio de módulo dinâmico por ultrassom.....	115
Figura 95: Posição dos transdutores para ensaio de módulo dinâmico (faces 1-3).....	115
Figura 96: Esquema para realização do ensaio de resistividade superficial.....	116
Figura 97: Posição do equipamento de resistividade elétrica em cada seção.....	117
Figura 98: Esquema para realização de leitura de potencial de corrosão	117
Figura 99: Posições para ensaio do eletrodo de potencial	118
Figura 100: Esquema para realização de tomografia ultrassônica	118
Figura 101: Posições para ensaio de tomografia	119
Figura 102: Esquema para realização de georradar	119
Figura 103: Posições para ensaio de georradar	119
Figura 104: Extração de testemunhos.....	121
Figura 105: Posição dos pontos para extração de testemunhos.....	121
Figura 106: Preparação dos testemunhos para ensaios físicos e mecânicos.....	122
Figura 107: Ensaio de resistência à compressão	123
Figura 108: Equipamentos e amostra para ensaio de absorção de água e índice de vazios ...	124
Figura 109: Delimitação do dormente para apresentação dos resultados.....	126
Figura 110: Resultado do ensaio de esclerometria face 1	127
Figura 111: Resultado do ensaio de esclerometria face 2	128
Figura 112: Resultado do ensaio de esclerometria face 3	129
Figura 113: Resultados do ensaio de ultrassom para as faces 1-3.....	130
Figura 114: Resultados do ensaio de ultrassom para a face 2	131
Figura 115: Resultados do ensaio de módulo dinâmico por ultrassom	132
Figura 116: Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para faces 1	133
Figura 117: Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para faces 2	134
Figura 118: Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para faces 3	135
Figura 119: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 1.	136
Figura 120: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 2.	136
Figura 121: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 3.	137
Figura 122: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 4.	137
Figura 123: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 5.	138

Figura 124: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 6.	138
Figura 125: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 7.	138
Figura 126: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 9.	139
Figura 127: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 10.	139
Figura 128: Imagem de tomografia do dormente 3 do grupo 1.....	140
Figura 129: Imagem de tomografia do dormente 1 do grupo 2.....	140
Figura 130: Imagem de tomografia do dormente 7 do grupo 3.....	140
Figura 131: Imagem de tomografia do dormente 10 do grupo 4.....	141
Figura 132: Imagem de tomografia do dormente 4 do grupo 5.....	141
Figura 133: Imagem de tomografia do dormente 3 do grupo 6.....	142
Figura 134: Imagem de tomografia do dormente 12 do grupo 7.....	142
Figura 135: Imagem de tomografia do dormente 3 do grupo 9.....	142
Figura 136: Imagem de tomografia do dormente 6 do grupo 10.....	143
Figura 137: Imagem de GPR do dormente 3 do grupo 1.....	143
Figura 138: Imagem de GPR do dormente 1 do grupo 2.....	143
Figura 139: Imagem de GPR do dormente 7 do grupo 3.....	144
Figura 140: Imagem de GPR do dormente 10 do grupo 4.....	144
Figura 141: Imagem de GPR do dormente 4 do grupo 5.....	144
Figura 142: Imagem de GPR do dormente 3 do grupo 6.....	144
Figura 143: Imagem de GPR do dormente 12 do grupo 7.....	145
Figura 144: Imagem de GPR do dormente 3 do grupo 9.....	145
Figura 145: Imagem de GPR do dormente 6 do grupo 10.....	145
Figura 146: Resultados do ensaio de resistência à compressão.....	146
Figura 147: Resultados do ensaio de índice de vazios	147
Figura 148: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade	148
Figura 149. Direção longitudinal para análise dos resultados	149
Figura 150. Direção transversal para análise dos resultados	149
Figura 151: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo.....	153
Figura 152: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo.....	153
Figura 153: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante A – centro	153
Figura 154: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante B – centro.....	154

Figura 155: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo	156
Figura 156: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo	156
Figura 157: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante A – centro	157
Figura 158: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante B – centro.....	157
Figura 159: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante A – ombro esquerdo	157
Figura 160: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante B – ombro esquerdo	158
Figura 161: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante A – centro	158
Figura 162: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante B – centro	158
Figura 163: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo.....	160
Figura 164: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo.....	160
Figura 165: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante A – centro	161
Figura 166: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante B – centro	161
Figura 167: Ensaio de resistividade elétrica e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo.....	164
Figura 168: Ensaio de resistividade elétrica e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo.....	164
Figura 169: Ensaio de resistividade elétrica e resistência à compressão – Fabricante A – centro	165
Figura 170: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante B – centro.....	165
Figura 171: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante A - ombro	168
Figura 172: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante B- ombro..	168
Figura 173: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante A - centro.	169
Figura 174: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante B - centro.	169
Figura 175: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo.....	173
Figura 176: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo.....	173

Figura 177: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante A – ombro esquerdo	174
Figura 178: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante B – ombro esquerdo	174
Figura 179: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante A – centro	175
Figura 180: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante B – centro	175
Figura 181: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante A – centro.....	176
Figura 182: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante B – centro.....	176
Figura 183: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante A – ombro esquerdo face 01	178
Figura 184: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – ombro esquerdo face 01	178
Figura 185: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante A – ombro esquerdo face 02	178
Figura 186: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – ombro esquerdo face 02	179
Figura 187: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – centro face 01.....	179
Figura 188: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – centro face 01.....	179
Figura 189: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante A – centro face 02.....	180
Figura 190: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – centro face 02.....	180
Figura 191: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante A – ombro esquerdo face 01-03	182
Figura 192: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante B – ombro esquerdo face 01-03.....	182
Figura 193: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante A – centro face 01-03	182
Figura 194: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante B – centro face 01-03.....	183
Figura 195: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante A – modo indireto face 2	183

Figura 196: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante B – modo indireto face 2	183
Figura 197: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante A – ombro esquerdo face 01-03.....	185
Figura 198: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante B – ombro esquerdo face 01-03.....	185
Figura 199: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante A – centro face 01-03	185
Figura 200: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante B – centro face 01-03	186
Figura 201: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante A – indireto face 02	186
Figura 202: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante B – indireto face 02	186
Figura 203: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante A – ombro esquerdo face 01-03	188
Figura 204: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante B – ombro esquerdo face 01-03	188
Figura 205: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante A – centro face 01-03	188
Figura 206: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante B – centro face 01-03	189
Figura 207: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 01.....	191
Figura 208: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 01.....	191
Figura 209: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 02.....	191
Figura 210: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 02.....	192
Figura 211: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 01.....	192
Figura 212: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 01.....	192

Figura 213: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 02.....	193
Figura 214: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 02.....	193
Figura 215: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 01	195
Figura 216: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 01	195
Figura 217: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 02	195
Figura 218: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 02	196
Figura 219: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 01.....	196
Figura 220: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 01.....	196
Figura 221: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 02.....	197
Figura 222: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 02.....	197

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Gama de velocidade de ultrassom de concretos feitos com diferentes agregados. .	52
Tabela 2. Coeficiente de correção da influência do aço na direção perpendicular à onda	56
Tabela 3. Coeficiente de correção da influência do aço na direção paralela à onda	58
Tabela 4. Efeito da temperatura na velocidade da onda ultrassônica	63
Tabela 5. Guia para interpretação dos resultados de resistividade elétrica superficial	84
Tabela 6. Guias para interpretação dos resultados do ensaio de potencial de corrosão	99
Tabela 7. Resultados do ensaio de esclerometria para face 1	127
Tabela 8. Resultados do ensaio de esclerometria para face 2	128
Tabela 9. Resultados do ensaio de esclerometria para face 3	129
Tabela 10. Resultados do ensaio de ultrassom para face 1-3	130
Tabela 11. Resultados do ensaio de ultrassom para face 2	131
Tabela 12. Resultados do ensaio de módulo dinâmico por ultrassom nas faces 1-3	132
Tabela 13. Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 1	133
Tabela 14. Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 2	134
Tabela 15. Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 3	135
Tabela 16. Resultados do ensaio de resistência à compressão	146
Tabela 17. Resultados do ensaio de índice de vazios	147
Tabela 18. Resultados do ensaio de índice de absorção por capilaridade	148
Tabela 19. Resultados do teste ANOVA para direção longitudinal	150
Tabela 20. Resultados do teste ANOVA para direção transversal	150
Tabela 21. Resultados do teste ANOVA para o modo direto (face 1-3)	154
Tabela 22. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de módulo dinâmico – face 1-3	159
Tabela 23. Resultados do teste ANOVA para direção longitudinal	162
Tabela 24. Resultados do teste ANOVA para direção transversal	162
Tabela 25. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de resistência à compressão	167
Tabela 26. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de índice de vazios	170
Tabela 27. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de absorção por capilaridade	172
Tabela 28. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e esclerometria	177
Tabela 29. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e velocidade de ultrassom (direto e indireto)	181

Tabela 30. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre índice de vazios e velocidade de ultrassom (direto e indireto)	184
Tabela 31. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e módulo dinâmico por ultrassom	187
Tabela 32. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial.....	190
Tabela 33. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre absorção capilar e resistividade elétrica superficial	194

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Propriedades físicas dos agregados investigados	52
Quadro 2. Características físicas dos materiais rochosos utilizados	53
Quadro 3. Quantidade de dormentes por ano de fabricação	110
Quadro 4. Quantidade de dormentes usados e não usados	110
Quadro 5. Número de medições a efetuar para cada ensaio não destrutivo.	120
Quadro 6. Quantidade de testemunhos para ensaio de resistência à compressão.....	122
Quadro 7. Quantidade de testemunhos para ensaio de absorção de água e índice de vazios .	124
Quadro 8. Quantidade de testemunhos para ensaio de absorção de água por capilaridade....	124

SIMBOLOS, ABREVIACÖES E SIGLAS

ABREVIACÖES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
END	ensaios não destrutivos
DEF	formação de etringita tardia
FA	cinza volante
GPR	radar de penetração no solo
IE	índice esclerométrico
MK	metacaulim
NBR	Normas Brasileira
RAA	Reação álcali-agregado

SÍMBOLOS

C3A	Aluminato tricálcico
CaSO ₄	Gesso
Hz	Hertz
V	velocidade de propagação da onda
V _c	velocidade de propagação da onda no concreto simples
V _s	velocidade da onda no aço em
L	comprimento total do percurso
L _s	Comprimento do caminho através do aço
T	Tempo de trânsito da onda ultrassônica
Ø	Diâmetro
%	Porcentagem
m/s	Metros por Segundo
ρ	Massa específica do concreto
kg	Kilograma
μ	Coefficiente de Poisson
E _d	Módulo de elasticidade
(Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaCO ₃	carbonato de cálcio
V _r	Coefficiente de variação
ρ	Resistividade elétrica do elétrica do material
σ	Condutividade elétrica
Ωm	Ohm por metros
R	Resistência elétrica
A	Área de secção reta do material condutor
L	Distância entre os materiais condutores
V	Diferença de potencial
I	Corrente elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	24
1.1	OBJETIVO	25
1.1.1	Objetivo geral	25
1.1.2	Objetivos específicos	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	DORMENTES FERROVIARIOS	26
2.1.1	Dormentes de madeira	27
2.1.2	Dormentes de aço	29
2.1.3	Dormentes de polímero.....	31
2.1.4	Dormentes de concreto.....	31
2.1.4.1	Mecanismos de deterioração em dormentes de concreto	32
2.1.4.1.1	<i>Fissuras resultante do processo de fabricação</i>	34
2.1.4.1.2	<i>Deterioração pela abrasão no local do trilho</i>	34
2.1.4.1.3	<i>Fissuras na região do assento do trilho</i>	35
2.1.4.1.4	<i>Descarrilamento</i>	36
2.1.4.1.5	<i>Carregamento de alto impacto</i>	37
2.1.4.1.6	<i>Reação álcali-agregado (RAA)</i>	37
2.1.4.1.7	<i>Formação de etringita tardia (DEF)</i>	38
2.1.4.1.8	<i>Ciclo de gelo e degelo</i>	39
2.1.4.2	Tipos de fissuras em dormentes de concreto	40
2.1.5	Inspeção em dormentes.....	41
2.2	MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	42
2.2.1	Método do pulso ultrassônico.....	43
2.2.1.1	Fatores que afetam a medição da velocidade das ondas ultrassônicas	46
2.2.1.1.1	<i>Idade do concreto</i>	46
2.2.1.1.2	<i>Relação água/cimento</i>	48
2.2.1.1.3	<i>Uso de aditivos e adições</i>	49
2.2.1.1.4	<i>Tipo de agregado</i>	51
2.2.1.1.5	<i>Presença de armadura</i>	54
2.2.1.1.6	<i>Umidade do concreto</i>	59
2.2.1.1.7	<i>Temperatura do concreto</i>	61
2.2.1.1.8	<i>Condições de cura</i>	63

2.2.1.2	Aplicações do método de ensaio de ultrassom	65
2.2.1.2.1	<i>Determinação da resistência à compressão</i>	65
2.2.1.2.2	<i>Determinação do módulo de elasticidade dinâmico</i>	67
2.2.1.2.3	<i>Tomografia ultrassônica</i>	67
2.2.1.2.4	<i>Detecção de falhas e profundidade de fissuras no concreto</i>	70
2.2.2	Métodos de dureza superficial	72
2.2.2.1	Fatores que afetam a medição da dureza superficial	74
2.2.2.1.1	<i>Influência da carbonatação do concreto</i>	74
2.2.2.1.2	<i>Influência da idade e tipo de cura do concreto</i>	75
2.2.2.1.3	<i>Influência da superfície no valor do índice esclerométrico</i>	77
2.2.2.1.4	<i>Influência do tipo de agregado</i>	77
2.2.2.1.5	<i>Influência da relação água cimento</i>	78
2.2.2.1.6	<i>Influência da umidade</i>	79
2.2.2.2	Aplicação do método de dureza superficial.....	80
2.2.3	Resistividade elétrica superficial.....	82
2.2.3.1	Fatores que afetam a medição da resistividade elétrica superficial.....	84
2.2.3.1.1	<i>Influência do agregado</i>	84
2.2.3.1.2	<i>Influência do tipo de cimento e relação água-cimento</i>	87
2.2.3.1.3	<i>Influência da armadura</i>	89
2.2.3.1.4	<i>Influência da carbonatação</i>	93
2.2.3.1.5	<i>Influência da umidade</i>	95
2.2.3.2	Aplicação do método de resistividade elétrica superficial	96
2.2.4	Potencial de corrosão	97
2.2.4.1	Fatores que afetam a medição do potencial de corrosão	99
2.2.4.1.1	<i>Influência da umidade</i>	99
2.2.4.1.2	<i>Influência da camada de recobrimento das armaduras</i>	101
2.2.4.1.3	<i>Influência da contaminação por cloretos</i>	103
2.2.4.1.4	<i>Influência da carbonatação</i>	104
2.2.4.2	Aplicação do método de potencial de corrosão	105
2.2.5	Radar de penetração no solo - GPR	107
3	PLANEJAMENTO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	108
3.1	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	108
3.1.1	Ensaio de esclerometria	112
3.1.2	Ensaio de ultrassom	113

3.1.3	Módulo dinâmico por ultrassom.....	114
3.1.4	Resistividade elétrica superficial do concreto.....	116
3.1.5	Ensaio de potencial de corrosão das armaduras	117
3.1.6	Ensaio de tomografia por ultrassom	118
3.1.7	Ensaio de georadar (GPR).....	119
3.2	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS DESTRUTIVOS.....	120
3.2.1	Extração de testemunho.....	120
3.2.2	Ensaio mecânico (resistência à compressão).....	122
3.2.3	Ensaios físicos	123
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA	125
4	RESULTADOS OBTIDOS	126
4.1	RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	126
4.1.1	Ensaio de esclerometria	126
4.1.2	Ensaio de ultrassom	129
4.1.3	Ensaio de módulo dinâmico por ultrassom.....	132
4.1.4	Ensaio de resistividade elétrica superficial	133
4.1.5	Ensaio de potencial de corrosão	136
4.1.6	Ensaio de tomografia por ultrassom	139
4.1.7	Ensaio de georadar (GPR).....	143
4.2	RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICO.....	145
4.2.1	Ensaio de resistência à compressão	145
4.2.2	Índice de vazios.....	146
4.2.3	Absorção por capilaridade	147
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	149
5.1	ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	150
5.1.1	Ensaio de esclerometria	150
5.1.2	Ensaio de ultrassom	154
5.1.3	Ensaio de módulo dinâmico por ultrassom.....	159
5.1.4	Ensaio de resistividade elétrica superficial	162
5.1.5	Ensaio de potencial de corrosão	165
5.1.6	Ensaio de tomografia por ultrassom	166
5.1.7	Ensaio de georadar (GPR).....	166
5.2	ENSAIOS DESTRUTIVOS	167
5.2.1	Ensaio de resistência à compressão	167

5.2.2	Índice de vazios.....	170
5.2.3	Absorção por capilaridade	172
5.3	CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E ENSAIOS FISICOS E MECANICO	177
5.3.1	Correlação entre resistência à compressão e esclerometria	177
5.3.2	Correlação entre resistência à compressão e velocidade de ultrassom (direto e indireto)	181
5.3.3	Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom (direto e indireto)	184
5.3.4	Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico por ultrassom...	187
5.3.5	Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial...	190
5.3.6	Correlação entre absorção capilar e resistividade elétrica superficial.....	194
6	CONCLUSÃO.....	198
	REFERÊNCIAS	200
	APÊNDICES	217

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de transporte contribuem, significativamente, para o crescimento social e econômico de qualquer país ao redor do mundo. Em todo planeta, os sistemas ferroviários estão entre as melhores e mais seguras opções de transporte para passageiros ou cargas, tornando-se um sistema de locomoção bastante movimentado, que apresenta como exigência a operacionalidade com níveis crescentes de locomoção e confiabilidade (JAMES et al., 2018).

Nestes sistemas ferroviários, os dormentes desempenham um papel fundamental, pois são os responsáveis por receber e transmitir ao lastro as cargas exercidas pelos veículos que transitam pela ferrovia, dando suporte aos trilhos, garantindo a sua fixação e mantendo constante a distância entre eles. Essas funções exigem que o dormente esteja intacto e livre de defeitos que possam comprometer a sua capacidade estrutural e durabilidade (SILVA et al., 2018). Os dormentes podem ser fabricados em madeira, aço, concreto ou material polimérico, sendo que cada material apresenta vantagens e desvantagens (JING et al., 2021). O foco desta pesquisa são os dormentes em concreto.

Entretanto, notou-se um aumento significativo de manifestações patológicas prematuras, o qual têm reduzido, significativamente, a vida útil dos dormentes de concreto em serviço, levando-os à ruptura e encarecendo os serviços de conservação e manutenção das ferrovias (FERDOUS, MANALO, 2014; MAYVILLE et al., 2014; GIBERT et al., 2017, LI et al., 2021, BASTOS et al., 2022; LIMA et al., 2022). Para evitar ou controlar estes problemas, inspeções nos dormentes em serviço devem ser realizadas de forma a avaliar o seu estado de conservação (GIBERT et al., 2017). Porém, as inspeções costumam ser feitas de forma visual por agentes caminhando ao longo da via em lados opostos, resultando em um trabalho difícil, demorado, subjetivo e perigoso, o que dificulta a tomada de decisão dos técnicos envolvidos (JAMES et al., 2018). Em muitos casos, esse método de inspecionar resulta na retirada prematura de dormentes que ainda possuíam condições de uso; ou então, são mantidos na ferrovia dormentes que deveriam ser substituídos, aumentando os custos nos processos (JING et al., 2021).

Desta forma, diferentes técnicas de ensaios não destrutivos têm sido utilizadas para avaliar a integridade dos elementos que compõem o sistema ferroviário, incluindo os dormentes (JOH et al., 2010; ZHANG et al., 2015, GIBERT et al. 2017, ARTAGAN et al., 2019). Estas técnicas têm identificado propriedades específicas que fornecem informações suficientes para serem utilizadas em inspeções de rotina.

Com a gama de técnicas de ensaio não destrutivos disponíveis atualmente, a combinação de diferentes técnicas, que complementem seus resultados e forneçam maior confiabilidade para a tomada de decisões durante as inspeções de dormentes de concreto, podem ser uma alternativa para esta necessidade.

1.1 OBJETIVO

Neste item são apresentados os objetivos gerais e específicos definidos para esta pesquisa.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização dos ensaios não destrutivos na inspeção de dormentes de concreto pretendido por meio da combinação de diferentes técnicas.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são apresentados abaixo:

- Elencar as principais técnicas de ensaios não destrutivos do mercado;
- Avaliar a utilização dessas técnicas para aplicação em dormentes;
- Classificar quais técnicas podem ser combinadas para uma avaliação mais precisa;
- Investigar a correlação entre os ensaios não destrutivos e as propriedades físicas e mecânica dos dormentes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

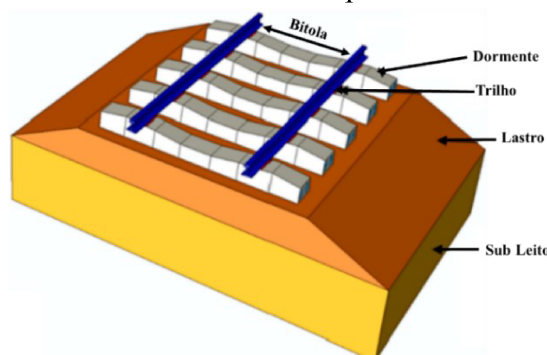
As ferrovias formam a espinha dorsal de todas as economias, transportando mercadorias e passageiros. Nas ferrovias, os dormentes desempenham um papel fundamental no desempenho e segurança da via no transporte ferroviário. Nas últimas décadas notou-se que a maioria dos dormentes não atinge seu período de vida útil esperado de cerca de 30 anos, resultando em substituição massiva e custos de reparo. Deste modo, inspeções confiáveis e econômicas de dormentes ferroviários é fundamental para garantir a operação segura e oportuna da rede ferroviária.

2.1 DORMENTES FERROVIARIOS

As ferrovias são um dos principais modais de transporte para a migração populacional e a movimentação de recursos, assumindo principalmente duas formas estruturais: vias com lastro e via em laje. A diferença evidente entre as duas formas é que a via com lastro adota lastro de brita como leito, enquanto a via em laje adota uma laje de concreto como leito. Ambas podem ser usadas para a construção de ferrovias de alta velocidade e convencionais (LIU et al., 2021).

Na estrutura de via com lastro, os dormentes são elementos da infraestrutura ferroviária cujo objetivo é receber e transmitir ao lastro os esforços exercidos pelos veículos que transitam pela ferrovia, dando suporte aos trilhos, permitindo sua fixação e garantindo a constância na bitola, que é a distância entre os trilhos, durante toda a sua vida útil (Figura 1). Estas funções exigem que os dormentes aplicados nas ferrovias estejam intactos, livres de defeitos que possam comprometer sua capacidade estrutural e durabilidade, de maneira a permitir, de certo modo, o nivelamento do lastro na sua base e se opor, de modo eficaz, aos deslocamentos longitudinais e transversais (SILVA et al., 2018).

Figura 1. Elementos de uma via permanente tradicional



Fonte: Adaptado de SHAKERI et al. (2022).

Os dormentes ferroviários podem ser fabricados com madeira, aço, concreto ou materiais poliméricos (Figura 2). Existem vantagens e desvantagens para cada material, sendo que aproximadamente 20 milhões de dormentes, no geral, são instalados por ano, muitas vezes em condições de serviço mais exigentes (JING et al., 2021).

Figura 2. Tipos de dormentes ferroviários



Fonte: Franca (2017).

2.1.1 Dormentes de madeira

O dormente de madeira é utilizado há mais de 180 anos. A madeira foi o primeiro material a ser usado na produção devido à disponibilidade, à época, relativamente alta, facilidade de instalação e capacidade de carga aceitável. Atualmente, encontram-se em vias antigas ou de pouco tráfego. No entanto, a maior preocupação na sua exploração reside no fato de que a própria madeira é suscetível à decomposição por fungos e ataque de cupins (JANELIUKSTIS et al., 2019; JABU et al., 2021). Ele possui certas características importantes que se constituem em vantagens, tais como: relativa leveza que facilita o manuseio, ótimo isolamento elétrico, reaproveitamento em casos de descarrilamento, reciclagem após utilização e proporciona boa elasticidade na via diminuindo o nível de ruído e trepidações. E como desvantagem tem o fato de ser suscetível ao ataque por fungos e insetos quando não tratado e a redução na oferta do material (madeira de lei) para produção (PLATONOV et al., 2019; LOJDA et al., 2019).

Os mecanismos de deterioração mais comuns dos dormentes de madeira são: decadência fúngica, rachadura da extremidade e ataques de cupins.

A decomposição fúngica é o modo predominante de deterioração do dormente de madeira, pois a madeira é suscetível à bio-deterioração de microrganismos. Um fungo pode

permanecer adormecido na madeira até obter um ambiente adequado contendo umidade, oxigênio e nutrientes. Os dormentes das ferrovias podem absorver a umidade, especialmente nas estações chuvosas, que torna os fungos reativos e, quando estão na madeira, podem se espalhar de um dormente para outro e afetar negativamente a integridade estrutural da ferrovia. A Figura 3 apresenta a decomposição fúngica de um dormente de madeira em uma ferrovia (FERDOUS; MANALO, 2014; JABU et al., 2021).

Figura 3. Deterioração do dormente de madeira devido à decomposição fúngica



Fonte: Ferdous e Manalo (2014).

A deterioração de um dormente de madeira devido à rachadura em sua extremidade é o modo de falha mais comum que surge quando o dormente é submetido a uma grande carga de cisalhamento transversal. Além disso, o trilho é conectado a cada dormente por um sistema de fixação adequado que inclui um clipe de fixação de trilho, placa de dormente e espigão de parafuso, um dormente pode rachar ao longo do tempo conforme se vê na Figura 4 (MANALO et al., 2010; FERDOUS; MANALO, 2014; JABU et al., 2021).

O ataque de cupins em dormentes de madeira foi identificado como outra causa significativa de danos a dormentes e tem sido relatado que o custo mundial de reparação de estruturas e prevenção desses ataques é de aproximadamente um bilhão de dólares atualmente. Quando um cupim ataca a madeira, ele consome todos os materiais contendo celulose e causa danos permanentes (ver Figura 5). Invasões de cupins podem ser encontrados em dormentes rachados mesmo depois de tratado (FERDOUS; MANALO, 2014; JABU et al., 2021).

Figura 4. Rachadura lateral do dormente de madeira



Fonte: Ferdous e Manalo (2014).

Figura 5. Rachadura lateral do dormente de madeira

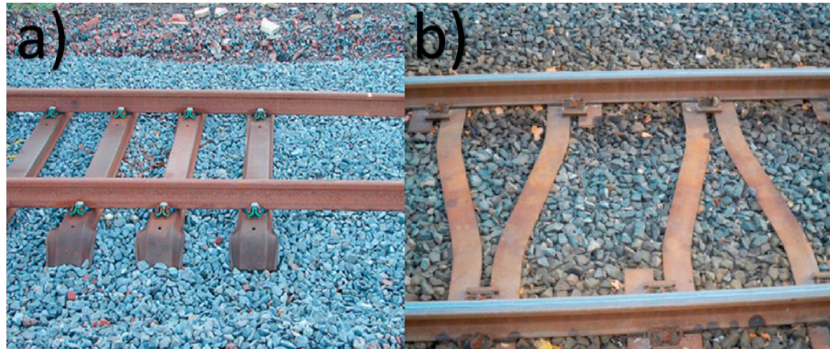


Fonte: Jabu et al. (2021).

2.1.2 Dormentes de aço

Um dormente de aço pesa menos que o dormente de madeira, o que o torna fácil de manusear e apresenta boas resistências mecânica e ao desgaste. No entanto, nos últimos tempos, estão sendo usados apenas em trilhos mais leves. Um dormente de aço em forma de Y em sua disposição horizontal, foi desenvolvido para substituir o tradicional dormente de aço (ver Figura 6). Comparando com o dormente de aço usual, o dormente de aço Y possui uma resistência muito maior contra movimentos transversais devido a maior quantidade de lastro contido entre as duas partes do garfo em Y (MANALO et al., 2010).

Figura 6. Dormentes de aço: a) tipo comum; b) em forma de Y



Fonte: Adaptado de Jing et al. (2018).

Poucos estudos de falha de dormentes de aço foram realizados. No entanto, vários pesquisadores relataram que o risco de corrosão do aço, alta condutividade elétrica, trincas por fadiga na região do assento do trilho ferroviário, dificuldade de embalá-lo com lastro, elevado custo de produção comparado aos outros tipos de material, constituem desvantagem para o aço como material para dormentes e por isso os dormentes de aço têm sido usados em quantidades moderadas (FERDOUS et al., 2021; JABU et al., 2021; AELA et al., 2022). Os mecanismos de deterioração mais comuns dos dormentes de aço, são: corrosão do aço e quebra por fadiga.

Os dormentes de aço sofrem corrosão nas áreas onde o solo de suporte ou lastro é rico em sais. O risco de corrosão é muito maior do que o trilho, embora ambos sejam feitos de aço, pois um dormente estabelece contato íntimo com os materiais de lastro e subleito. Os dormentes podem entrar em contato com diferentes sais do solo, águas subterrâneas ou agregados que podem reagir com o aço, levando à falha do dormente devido à corrosão (Figura 7). Além disso, outras razões, incluindo lastro à base de escória metálica, um ambiente continuamente úmido e a existência de materiais corrosivos, podem aumentar a corrosão em um dormente de aço (JABU et al., 2021; FERDOUS et al., 2015; FERDOUS et al., 2021).

Figura 7. Corrosão em dormente de aço

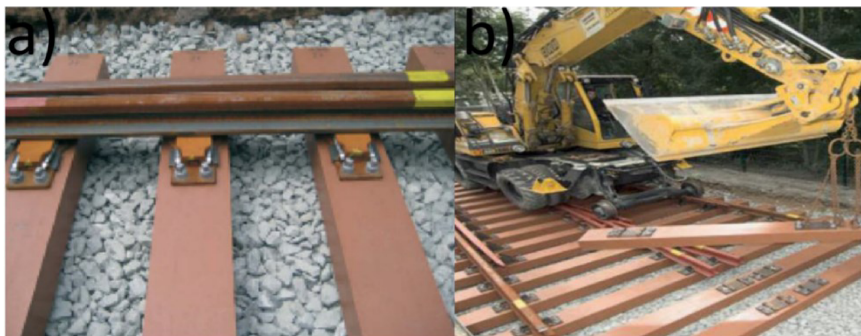


Fonte: Ferdous et al. (2021).

2.1.3 Dormentes de polímero

Atualmente, o mercado global de polímeros está crescendo rapidamente devido às muitas vantagens, incluindo alta relação resistência-peso, excelente resistência à corrosão, umidade, ataque de insetos e a não condutividade térmica e elétrica. Os dormentes de polímeros ou materiais compósitos (ver Figura 8) surgiram devido às preocupações ambientais com a utilização de materiais reciclados para redução dos impactos ambientais causados pela produção dos outros tipos de dormentes. Eles são uma mistura de plástico reciclado, borracha de pneus usados, fibras de vidro, produtos minerais e outros polímeros (JABU et al., 2021). Essa tecnologia surgiu como alternativa potencial aos dormentes de madeira. Diferente do aço e do concreto, os dormentes de polímeros podem ser projetados para imitar o comportamento da madeira (um requisito essencial para a manutenção de dormentes de madeira), são quase livres de manutenção e são mais sustentáveis do ponto de vista ambiental (FERDOUS et al., 2015).

Figura 8. Dormente de polímero a) e b)



Fonte: a) Adaptado de Manalo et al. (2010); b) adaptado de Ferdous et al. (2015).

2.1.4 Dormentes de concreto

Os primeiros dormentes de concreto foram projetados em concreto armado, mas a experiência no campo mostrou que esses dormentes não eram fortes o suficiente para suportar todas as cargas estáticas e dinâmicas de uma ferrovia (LIMA; CARNEIRO, 2022). Com a utilização do concreto protendido, tornou-se possível fazer dormentes de concreto mais fortes e com melhor desempenho. A sua utilização deve-se à disponibilidade de matéria-prima, boa longevidade, elevado peso próprio que garante uma boa fixação e estabilidade da ferrovia. A maior durabilidade do concreto também oferece maior vida útil sujeita a cargas estáticas e dinâmicas (JANELIUKSTIS et al., 2019). Na sua maioria, são fabricados e comercializados

dois tipos de dormentes de concreto, os do tipo bibloco (em concreto armado) e do tipo monobloco (em concreto protendido) conforme ilustrado na Figura 9 (JOKUBAITIS et al., 2020; SHAKERI et al., 2022). Nessa pesquisa serão estudados os dormentes do tipo monobloco de concreto protendido que geralmente é instalado em ferrovias com lastro.

Figura 9. Tipos de dormentes de concreto



Fonte: Adaptado de MAYVILLE et al., (2014); ÇEÇEN e AKTAŞ (2021).

O concreto utilizado no fabrico do dormente deve ter alta resistência e durabilidade, baixa porosidade e boas condições. Essas características podem ser obtidas com o uso de adições, aditivos especiais e baixa relação água/cimento, respeitando os requisitos normativos em relação ao consumo mínimo de cimento que deve ser de 350 kg/m^3 de concreto e resistência característica do concreto (f_{ck}) não inferior a 45 MPa, de acordo com a NBR 11709 (ABNT, 2015) e LI et al. (2021). Quanto às vantagens, apresentam boa resistência aos esforços mecânicos, requerem menos intervenções na via e proporcionam um período de vida útil de aproximadamente 30 anos (LI et al., 2022). Durante o período de serviço, os dormentes podem desenvolver diferentes tipos de defeitos e resultar em falha estrutural relacionadas à diferentes mecanismos de deterioração oriundas do processo de produção, utilização e o ambiente onde foram colocados. Isso têm feito com que ao redor do mundo, em muitas ferrovias, os dormentes são substituídos antes de atingirem seu período de vida útil, onerando os serviços de conservação e manutenção periódica da ferrovia, onerando os custos e o esforço para inspeção e monitoramento da via relacionados à segurança e conforto (GIBERT et al., 2017; LI et al., 2019; KIM et al., 2020; LI et al., 2021; LI et al., 2022; BASTOS et al., 2022).

2.1.4.1 Mecanismos de deterioração em dormentes de concreto

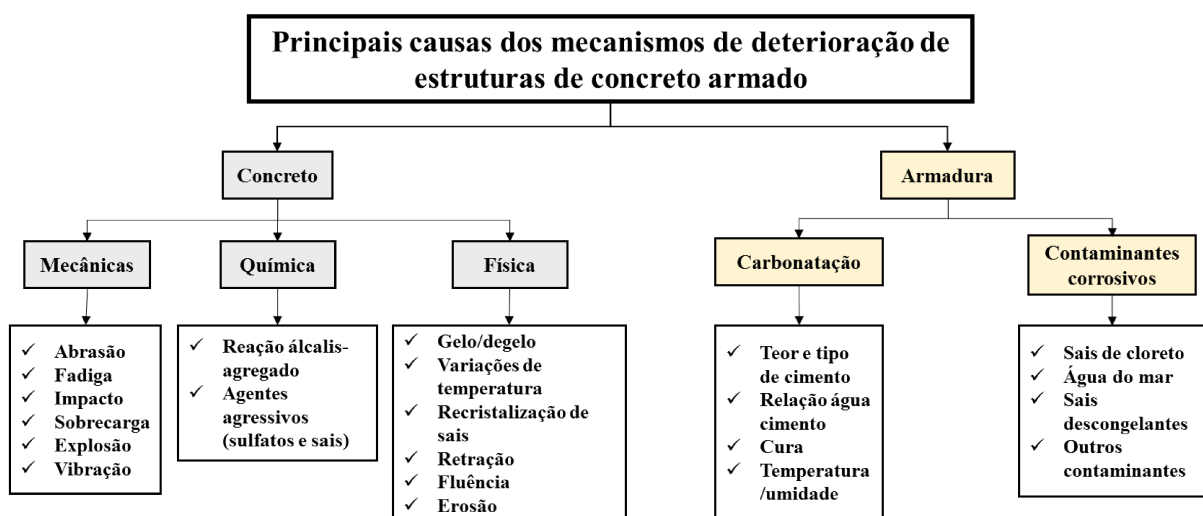
A durabilidade das estruturas em concreto armado está essencialmente ligada ao fato da estrutura, ao longo de certo período, não sofrer danos significativos, ser capaz de

preservar sua forma original, estética e resistência aos esforços mecânicos após a exposição ao ambiente de uso para o qual foi projetado. Nessa etapa, a estrutura será considerada durável se apresentar resistência à ação das intempéries, ataque químico, ataques biológicos, abrasão e outras condições em serviço (METHA E MONTEIRO, 2014; TANTA et al., 2022).

A deterioração em forma de anomalias (mecanismos de deterioração) modifica o estado ideal de funcionamento e de serviço das estruturas em concreto armado. As causas do surgimento desses mecanismos de deterioração podem estar relacionadas com as fases de projeto, construção e utilização sem deixar de lado os acidentes em consequência de quaisquer fenômenos anômalos tais como catástrofes naturais ou explosões (RAMESH et al., 2021).

O conhecimento das origens da deterioração (mecanismos de deterioração) das estruturas de concreto é indispensável para garantir o bom desempenho estrutural através dos serviços de manutenção e reparação, de modo que as estruturas possam atingir o período de vida útil esperado (ALEXANDER et al., 2019). O agrupamento destes mecanismos por similaridade é discutível e nesta pesquisa os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado foram agrupados conforme organograma da Figura 10.

Figura 10. Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado



Fonte: Adaptado de SOUZA e RIPPER (2009); ABNT NBR 6118 (2014).

As causas de deterioração mais comuns dos dormentes de concreto são: fissuras resultantes do processo de fabricação, deterioração pela abrasão do local do trilho, fissuras na região do assento do trilho, fissuras no centro, descarrilamentos, carregamento de alto impacto, reação álcali-agregado (RAA), formação de etringita tardia (DEF) e ciclo de gelo e degelo.

2.1.4.1.1 Fissuras resultante do processo de fabricação

As fissuras resultantes do processo de fabricação dos dormentes geralmente estão relacionadas à força de protensão aplicada ao concreto. Como os dormentes raramente contêm armadura transversal, as fissuras podem se propagar longitudinalmente (ver Figura 11) e levar à deterioração estrutural da dormente, reduzindo sua capacidade de carga (SILVA et al., 2018).

Geralmente, as fissuras se formam quando a liberação da força de protensão ocorre antes que o concreto tenha desenvolvido resistência suficiente. No entanto, outros fatores como a espessura do recobrimento do concreto, tipo de agregado e tipo de armadura também podem influenciar na intensidade da formação de fissuras. As barras de aço com superfície rugosa, por exemplo, aumentam a adesão do aço ao concreto em comparação com as barras lisas, mas diminuem o comprimento de transferência da protensão, aumentando assim a tensão na interface entre o concreto e a barra de aço o que aumenta a suscetibilidade dos dormentes à fissuração (YU et al., 2015; LIMA; CARNEIRO, 2022).

Figura 11. Dormentes fissurados após fabricação



Fonte: Silva et al. (2018).

2.1.4.1.2 Deterioração pela abrasão no local do trilho

A abrasão no local do trilho ocorre devido aos movimentos relativos entre a almofada do trilho e o assento do trilho de concreto que, posteriormente, resultam no desgaste gradual da pasta de cimento do concreto por atrito (JANELIUKSTIS et al., 2019). Por ação da gravidade, as partículas finas abrasivas e a água penetram na interface trilho-apoio criando uma situação ideal para a abrasão. Vários fatores são responsáveis pela abrasão do assento ferroviário, incluindo a presença de água, cargas pesadas nos eixos, falha de fixadores, inclinações íngremes da pista e, particularmente, curvas maiores de dois graus. A Figura 12 mostra uma área de assento de trilho desgasta em um dormente de concreto (FERDOUS; MANALO, 2014; LIMA; CARNEIRO, 2022; EL-SAYED et al., 2022).

Figura 12. Falha do dormente de concreto devido à abrasão no local do trilho



Fonte: Lima e Carneiro (2022).

2.1.4.1.3 Fissuras na região do assento do trilho

Além da abrasão, na zona do apoio do trilho do dormente podem surgir fissuras graves e colocá-lo fora de uso. Essas fissuras ocorrem quando há um momento positivo elevado na região do assento ferroviário que ultrapassa o limite de resistência à tração do concreto, geralmente causado pelas cargas de alto impacto a que a via férrea é submetida durante a passagem dos trens (LIMA; CARNEIRO, 2022; EL-SAYED et al., 2022). Neste caso, a fissuração começa na parte inferior do dormente e sobe em direção aos trilhos conforme mostra a Figura 13.

Figura 13. Rachaduras na região do assento do trilho do dormente



Fonte: El-Sayed et al. (2022).

2.1.4.1.4 Descarrilamento

Defeitos em dormentes, que ocorrem principalmente durante a fase operacional por falta de mão de obra qualificada e defeitos imperceptíveis existentes nas ferrovias, podem causar descarrilamentos e inoperar a ferrovia. Esses defeitos nos dormentes fazem com que a bitola da via seja maior do que alguma dimensão equivalente da bitola do rodado do trem. Uma vez ocorrido o descarrilamento, os dormentes danificados precisam ser substituídos, o que aumenta os custos de manutenção da via. A Figura 15 mostra dormentes danificados por descarrilamento (FERDOUS; MANALO, 2014; BASTOS et al., 2018).

Figura 14. Dormentes danificados por descarrilamento



Fonte: Ferdous e Manalo (2014).

2.1.4.1.5 Carregamento de alto impacto

As rachaduras de flexão em um dormente de concreto são frequentemente detectadas no meio vão e, eventualmente, reduzem a rigidez de flexão do dormente. Muitas organizações ferroviárias observaram rachaduras em dormentes de concreto durante às inspeções de campo, com a causa primaria como uma carga de roda pouco frequente mas de alta magnitude e curta duração. Eles indicaram que isso é normalmente produzido por anormalidades nas rodas ou nos trilhos, como rodas planas e trilhos afundados (KAEWUNRUEN; REMENNIKOV, 2008; CAMILLE et al., 2022). A Figura 16 mostra dormentes danificados por carregamento de alto impacto.

Figura 15. Dormentes danificados por carregamento de alto impacto



Fonte: Camille et al. (2022)

2.1.4.1.6 Reação álcali-agregado (RAA)

A reação álcali-agregado (RAA) ocorre entre a solução intersticial do concreto, que é rica em álcalis, e certos agregados que contém sílica reativa, usados na confecção do concreto. Ou seja, quando agregados suscetíveis (tipicamente aqueles que contém morfologias de sílica semicristalina instável ou mecanicamente deformada) reagem com os álcalis (sódio e potássio) presentes no cimento, resultando na formação de um gel absorvente e expansivo. Esse gel absorve água e incha, criando pressões e expansões adicionais, fraturando os agregados e a

pasta de cimento circundante (PORTELLA et al., 2021). Para que a reação ocorra, agregados reativos, alta concentração alcalina no cimento e umidade devem estar presentes. Enquanto a reação progride, o concreto se deteriora à medida que as fissuras internas avançam e se interconectam. Em caso extremo, a RAA pode resultar na desintegração completa do concreto do dormente (LI et al., 2022). A principal característica visual desse mecanismo de deterioração é a ocorrência de fissuras mapeadas conforme Figura 17, ou seja, fissuras orientadas aleatoriamente na superfície do concreto. As rachaduras criam aberturas para agentes agressivos, como cloreto, sulfato e carbonatos, que podem corroer as armaduras de aço internas (LIMA; CARNEIRO, 2022).

Figura 16. Fissuras em dormentes de concreto devido a RAA



Fonte: Lima e Carneiro (2022).

2.1.4.1.7 Formação de etringita tardia (DEF)

Dentre as falhas relacionadas ao ataque químico, a formação retardada de etringita (DEF) é a mais comum em dormentes de concreto protendido. Esta falha está associada à existência de fontes internas de sulfato, ou seja, às vezes os agregados usados na confecção do concreto, podem conter sulfatos de sódio, potássio, magnésio e cálcio que, quando presentes em solução, reagem com os componentes de aluminato tricálcico ou hidróxido de cálcio da pasta de cimento (GODART, 2017). No entanto, acredita-se que a etringita primária produzida no concreto de idade precoce (através da reação do aluminato tricálcico (C3A) com o gesso (CaSO₄)) se decompõe em temperaturas acima de 65°C. Quando o concreto retorna à temperatura ambiente e absorve água de fontes externas, a etringita se regenera, formando

cristais que geram altas pressões internas que levam à fissuração e desintegração do concreto (HASPARYK et al, 2016).

Os dormentes de concreto protendido são suscetíveis ao DEF porque seu processo de produção requer alta resistência inicial em poucas horas de concretagem, o que geralmente requer o uso de cura térmica. Este tipo de cura acelera o endurecimento do concreto aumentando a temperatura ambiente. A água necessária para iniciar a reação do DEF vem da umidade do ambiente depois que os dormentes são colocados nos trilhos (LIMA; CARNEIRO, 2022).

A fissuração resultante do DEF propaga-se de forma multidirecional (ver Figura 18), ligeiramente semelhante à fissuração causada pelo RAA, embora os mecanismos envolvidos nas reações expansivas sejam diferentes.

Figura 17. Rachadura do dormente de concreto protendido por DEF



Fonte: Lima e Carneiro (2022).

2.1.4.1.8 *Ciclo de gelo e degelo*

Em locais onde a temperatura do ar oscila entre valores próximos de zero, os dormentes de concreto podem sofrer danos causados pelos ciclos de gelo e degelo (congelamento e descongelamento). Defeitos associados a esses ciclos incluem fissuras estruturais e fragmentação do concreto (ver Figura 19), que levam a diminuições significativas na resistência à compressão e tração do concreto devido a microfissuras em sua matriz (LIMA; CARNEIRO, 2022). Li et al. (2019) mostraram que os danos por ciclos de gelo/degelo aumentam os efeitos da fluência e a retração dos dormentes em serviço. Isto, possivelmente, acontece devido ao fato de que à medida que a água no concreto úmido congela, ela produz pressões osmóticas e hidráulicas nos capilares, poros da pasta de cimento e agregados. Se essas pressões excederem à resistência à tração da pasta ou agregado circundante, uma fissura se

formará, com redução da resistência à compressão do concreto, perda de protensão e consequentemente, a redução do período de vida útil do dormente.

Figura 18. Trinca cônica devido ao ciclo de gelo e degelo



Fonte: Ferdous e Manalo (2014).

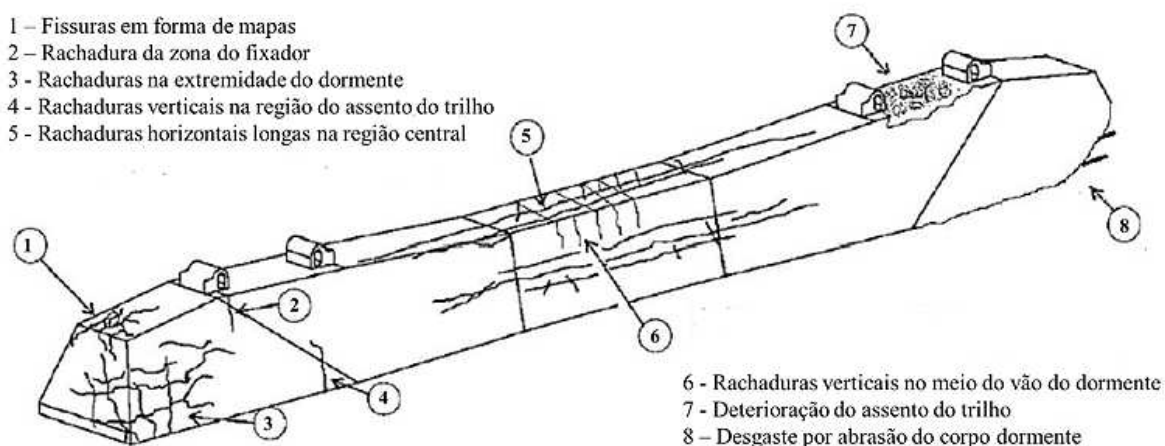
2.1.4.2 Tipos de fissuras em dormentes de concreto

Como visto anteriormente, as falhas ou mecanismos de deterioração em dormentes de concreto protendido podem estar ligados à diversos fatores, como processo de fabricação do dormente, os materiais utilizados e o ambiente onde o dormente é instalado. Embora os mecanismos deterioração sejam classificados e analisados separadamente, a maioria deles não ocorre isoladamente. Os dormentes podem ser afetados por mais de um tipo de falha e, muitas vezes, o mecanismo de ocorrência dessas falhas estão relacionados entre si. Por exemplo, fissuras resultantes do processo de fabricação do dormente, podem tornar o dormente mais suscetível à degradação química; a fissuração devido a fatores químicos pode enfraquecer o concreto, tornando o dormente mais suscetível à fissuração causada por cargas dinâmicas (LIMA; CARNEIRO, 2022).

A fissuração é a principal manifestação da maioria das falhas apresentadas pelos dormentes de concreto protendido. A localização e a forma das fissuras são uma boa indicação da causa da falha. As fissuras resultantes de ataques químicos geralmente aparecem mais aleatoriamente (fissuras semelhantes a mapas). As trincas resultantes de cargas de alto impacto são verticais e podem aparecer tanto no meio do vão do dormente quanto na região do assento do trilho, dependendo das condições de apoio do dormente. Fissuras longitudinais podem ocorrer como resultado do processo de fabricação inadequado do dormente (LIMA;

CARNEIRO, 2022). Os principais tipos de fissuras que ocorrem em dormentes de concreto protendido são apresentados na Figura 20.

Figura 19. Fissuras típicas em dormentes de concreto protendido



Fonte: Adaptado de Lima e Carneiro (2022).

O desenvolvimento e acúmulo de fissuras no concreto é a principal causa da falha dos dormentes. E isto tem feito com que em muitas ferrovias apenas uma pequena percentagem de dormentes de concreto permanece em serviço ao atingir a vida útil pretendida, resultando em altos custos de manutenção e substituição. (TATARINOV et al., 2019). Sendo assim, as fissuras em dormentes de concreto devem receber atenção especial, pois podem causar perda de protensão, facilitar a entrada de agentes agressivos e afetar negativamente a função estrutural, comprometendo o bom desempenho da peça, inclusive perda de funcionalidade na ferrovia. Deste modo, através dos serviços de inspeção, os dormentes de concreto na maioria dos casos têm sido substituídos simplesmente quando rachaduras visíveis aparecem na superfície, resultando em manutenção excessiva da via. (KAEWUNRUEN; REMENNIKOV, 2009; SILVA et al., 2018).

2.1.5 Inspeção em dormentes

A inspeção ferroviária é uma tarefa crítica nas operações de manutenção ferroviária que é, periodicamente, realizada para prevenir riscos que podem ter consequências jurídicas e financeiras significativas para as organizações ferroviárias e para evitar acidentes e proporcionar segurança para operadores e passageiros (ABDELHAMEED et al., 2020). As inspeções em dormentes nas ferrovias, cujo objetivo é avaliar o seu estado de conservação

através da observação visual por inspetores caminhando ao longo da via em lados opostos, continua sendo o método de avaliação mais comum embora o lastro obscureça a avaliação visual de cinco dos seis lados de um dormente (JING et al., 2021). Desse modo, isto tem resultado num trabalho difícil, demorado e que dificulta a tomada de decisão dos técnicos envolvidos, isto porque os métodos de inspeção visual observam apenas superfície e não dão informações sobre a profundidade de penetração das fissuras, e isso em muitos casos, resulta na retirada prematura de dormentes que ainda possuíam condições de uso, ou então, são mantidos na ferrovia dormentes que deveriam ser substituídos. Nas duas condições custos não são evitados (TATARINOV et al., 2019).

No entanto, existem tecnologias que podem auxiliar as inspeções visuais e avaliar a integridade estrutural dos dormentes em ambiente ferroviário real. Sendo assim, diferentes técnicas de ensaios não destrutivos têm sido utilizadas para avaliar estruturas de concreto quanto ao seu estado de conservação, ou até mesmo quanto a ocorrência de algum sinistro/dano, e dentre estas estruturas encontram-se também os dormentes de concreto (JOH et al., 2010; ZHANG et al., 2015; TATARINOV et al., 2019).

2.2 METODOS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os métodos de ensaios não destrutivos (END) têm potencial crescente para fazer parte de um sistema de gestão de infraestruturas de modo a atingir e manter um nível considerado de segurança estrutural, durabilidade e desempenho. Os métodos abrangem um amplo grupo de técnicas de medição e análise usadas no processo de avaliação estrutural precoce e regular, de maneira a garantir a qualidade durante e após a construção de novas estruturas, caracterização das propriedades dos materiais e dos danos em função do tempo e das influências ambientais. A sua principal vantagem é a capacidade de examinar o material de forma não invasiva, sem danificar ou alterar a composição do elemento examinado (MEIERHOFER et al., 2010, RUCKA, 2020, TANTA et al., 2022).

A maioria dos END são ensaios indiretos e qualitativos, ou seja, as condições do concreto são inferidas da resposta medida a algum estímulo, como por exemplo um impacto ou radiação eletromagnética e, em seguida, são identificadas as variações espaciais nos parâmetros medidos. Desse modo, a combinação de END é recomendada para comparação dos resultados obtidos por meio de duas ou mais técnicas, de forma a confirmar as medidas e variações registradas e melhorar a interpretação dos resultados (HELSEL et al., 2021; NORHASRI et al., 2021).

A natureza dos equipamentos de END varia de dispositivos portáteis simples e acessíveis à equipamentos complexos, caros e altamente especializados e, em alguns casos, exigindo preparações extensivas ou precauções de segurança, sendo usados apenas na impossibilidade das alternativas mais simples. Poucos métodos de END fornecem a medição quantitativa direta da propriedade desejada, sendo assim, não é recomendado confiar apenas nos resultados de END para a maioria dos levantamentos das condições das estruturas (BUNGEY et al., 2006, HUSSEIN et al., 2021; AL-HURI et al., 2022). Assim, é necessário o estabelecimento de correlações com as propriedades do material obtidas por amostragens invasivas para uma avaliação mais sólida sendo que, os métodos invasivos fornecem verificações dos resultados de END e complementam as investigações do elemento estrutural inspecionado (HELSEL et al., 2021; SALEH et al., 2022).

Neste trabalho serão usados os métodos de ensaios de ultrassom, dureza superficial, resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão da armadura, módulo dinâmico por ultrassom, tomografia por ultrassom e georadar (GPR).

2.2.1 Método do pulso ultrassônico

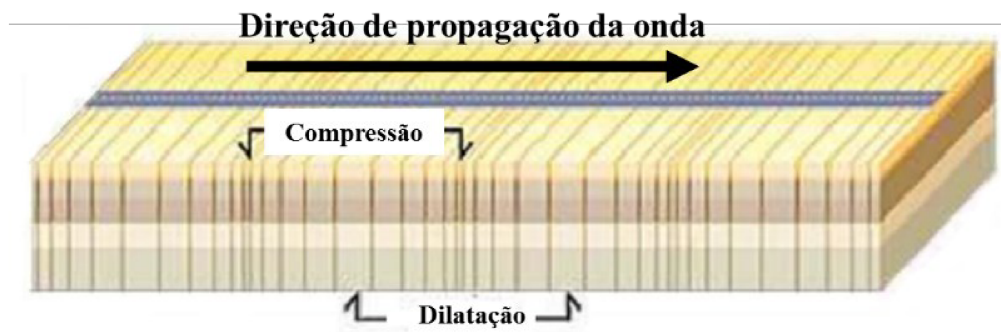
O método do pulso ultrassônico, por várias décadas, tem sido usado com sucesso na avaliação da qualidade do concreto. Este método permite detectar rachaduras internas e outros defeitos, bem como alterações no concreto devido à deterioração provocada pelo ambiente onde a estrutura em análise está inserida. Trata-se de um método totalmente não destrutivo que utiliza ondas mecânicas que não danificam a estrutura em análise e que permite que ela seja analisada várias vezes no mesmo local (BUNGEY et al., 2006; OFUYATAN et al., 2021; AL-HURI et al., 2022).

As ondas ultrassônicas, como as ondas sonoras, são vibrações mecânicas com frequências acima da faixa audível que geralmente é tomada de 20 Hz a 20 kHz. As ondas sonoras com frequências superiores a 20 kHz são conhecidas como ondas ultrassônicas. A vibração se propaga pelo sólido e sua velocidade em um meio elástico depende de alguns fatores tais como: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade e geometria do elemento analisado (MALHOTRA; CARINO, 2004; HUSSEIN et al., 2021; KUMAR et al., 2021). As ondas ultrassônicas são classificadas com base no modo de vibração das partículas do meio na direção de propagação das ondas, podendo ser ondas longitudinais, transversais ou superficiais.

As ondas longitudinais ou compressivas (onda P) apresentam zonas alternadas de compressão e dilatação produzidas pela vibração das partículas paralelas à direção de

propagação da onda (Figura 20). Suas partículas de deslocamento estão na direção de propagação da onda, que apresenta maior velocidade, maior facilidade de emissão e detecção entre os demais tipos de onda. Esse tipo de onda se propaga em sólidos, líquidos e gases sendo, por isso, a mais utilizada em ensaios ultrassônicos (FISK, 2018; NORHASRI et al., 2021).

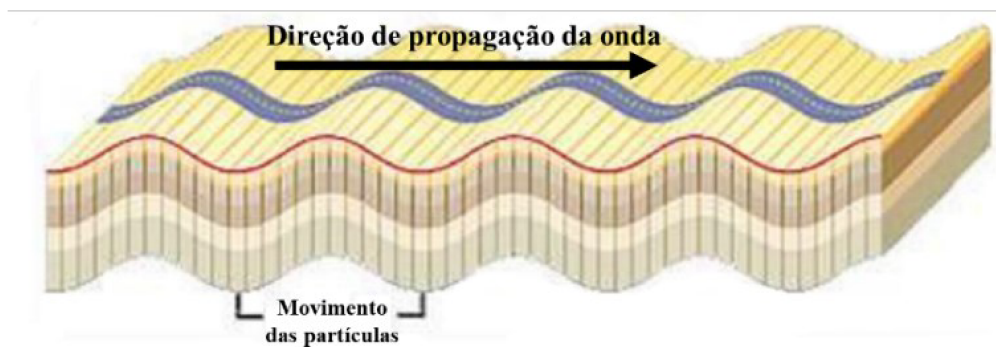
Figura 20. Ondas de compressão (onda P)



Fonte: Fisk (2018).

Nas ondas transversais ou cisalhantes (onda S), a direção do deslocamento da partícula é perpendicular ou transversal à direção de propagação (Figura 21). Neste tipo de onda, a energia do ultrassom se propaga através do material com uma velocidade de cerca de 50% da velocidade da onda de compressão (FISK, 2018; IAEA, 2018; NORHASRI et al., 2021).

Figura 21. Ondas cisalhantes (onda S)



Fonte: Fisk (2018).

Nas ondas de superfície ou Rayleigh, o movimento das partículas se dá nas proximidades da superfície e é uma combinação das ondas de compressão e ondas cisalhantes,

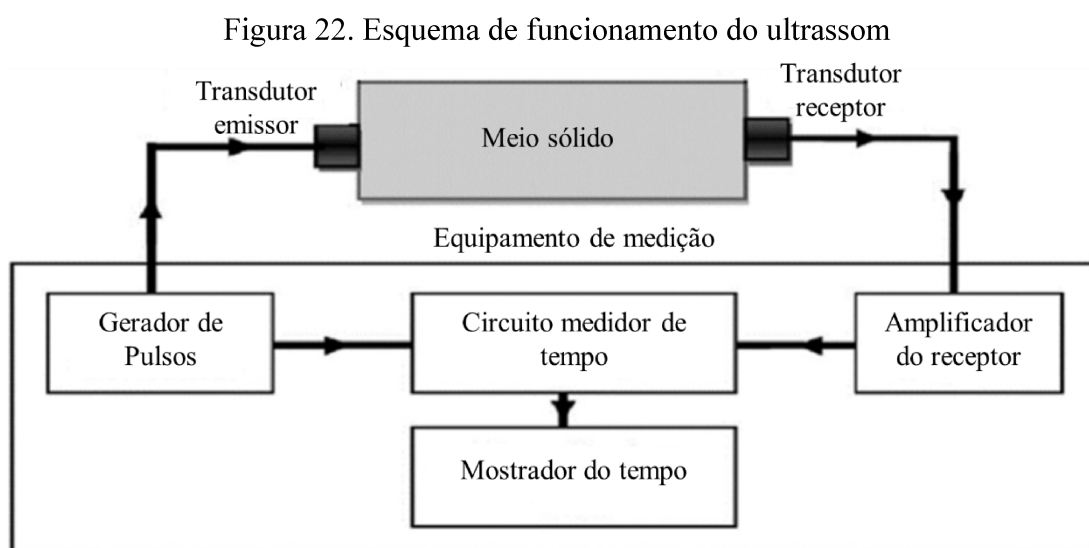
e o movimento das partículas é elíptico. Este tipo de onda é útil na detecção de defeitos superficiais (FISK, 2018; NORHASRI et al., 2021).

As ondas de compressão possuem valores de velocidade de propagação maiores que as ondas cisalhantes e de superfície, e utilizando-se o comprimento da distância entre os transdutores é possível calcular a velocidade média de propagação da onda compressiva a partir da divisão distância/tempo (equação 1).

$$V = \frac{L}{t} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: V: propagação de velocidade da onda em m/s; L: distância entre os transdutores em m; t: tempo de percurso da onda em s.

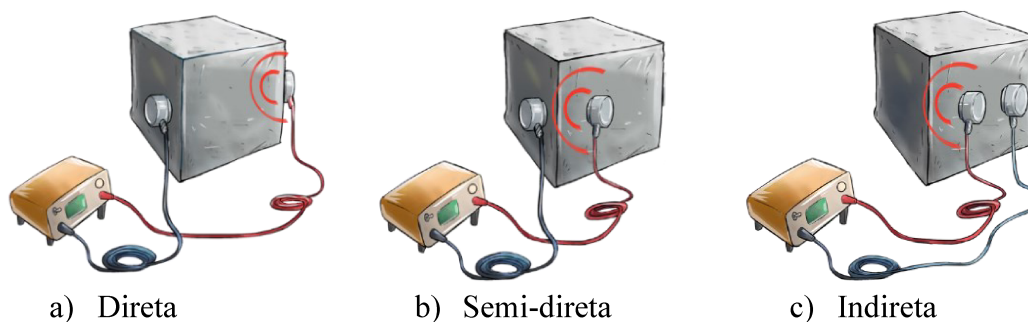
O equipamento de ultrassonografia é composto por um circuito eletrônico capaz de gerar os pulsos que são transformados em ondas ultrassônicas e transmitidos para o concreto, recebidos por um transdutor-receptor, amplificadas e transformadas em pulsos elétricos novamente, permitindo que se meça o tempo de propagação. O circuito básico em funcionamento é apresentado na Figura 22.



Fonte: Revilla-Cuesta et al. (2021).

No Brasil, o ensaio de ultrassom é regulado pela ABNT NBR 8802 (2019), e segundo a norma, existem três formas para a transmissão de onda sobre a superfície do concreto: forma direta, semi-direta e indireta, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23. Tipos de transmissão no ensaio de ultrassom



Fonte: Santos (2022).

Para garantir a eficácia do método é necessário um alinhamento correto dos tradutores e um bom acoplamento com a superfície, que pode ser auxiliado usando um gel de acoplamento. Também, é recomendado ter em conta os fatores que afetam o valor medido da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (ABNT NBR 8802, 2019; ASTM C 597, 2016; TAN et al., 2018).

2.2.1.1 Fatores que afetam a medição da velocidade das ondas ultrassônicas

Existem diversos fatores que afetam o valor medido da velocidade das ondas ultrassônicas. Entre esses fatores, temos: idade do concreto, relação água/cimento, uso de aditivos, tipo de agregado, presença de armadura, umidade e temperatura, direção de ensaio, tipo de adensamento, presença de microfissuras, cura e tipo de cimento. O conhecimento da influência desses fatores no valor medido é de grande importância na aferição dos resultados obtidos.

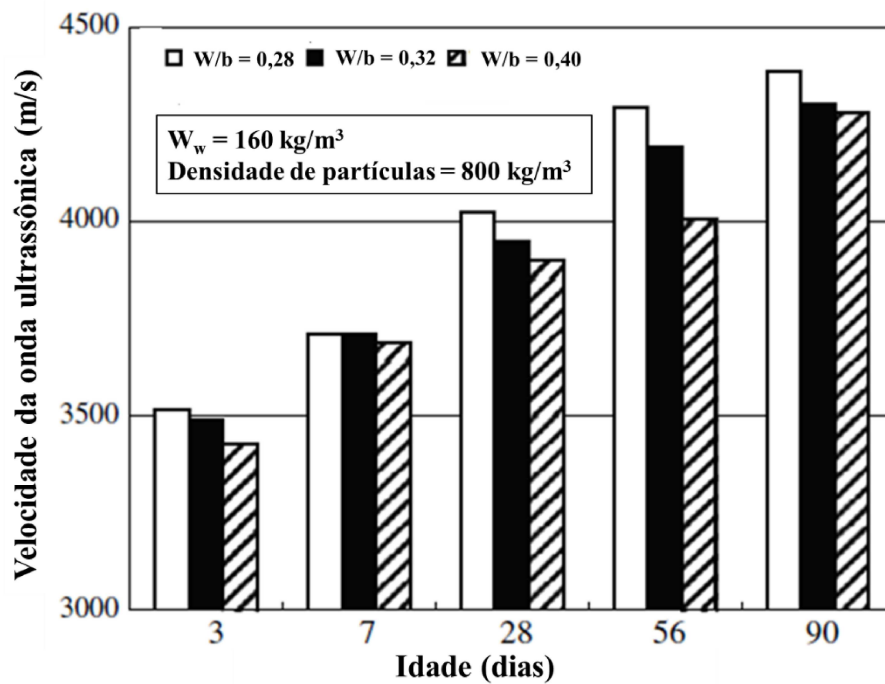
2.2.1.1.1 Idade do concreto

O grau de hidratação do cimento tem relação com a porosidade do concreto com destaque nas primeiras idades. Eles são maiores nas primeiras idades (24 à 48 horas) e diminuem à medida que a idade aumenta. A resistência mecânica do concreto e a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas são menores nas primeiras idades e aumentam ao longo do tempo (GODINHO et al., 2020; LEE et al., 2020; RAACH et al., 2020; HONG et al., 2021).

Wang (2009) ao examinar a durabilidade do concreto com agregados leves com diferentes relações água/cimento, verificou que a maior velocidade da onda ultrassônica é vista quando o concreto tem uma baixa relação água/cimento e idade elevada, conforme Figura 24.

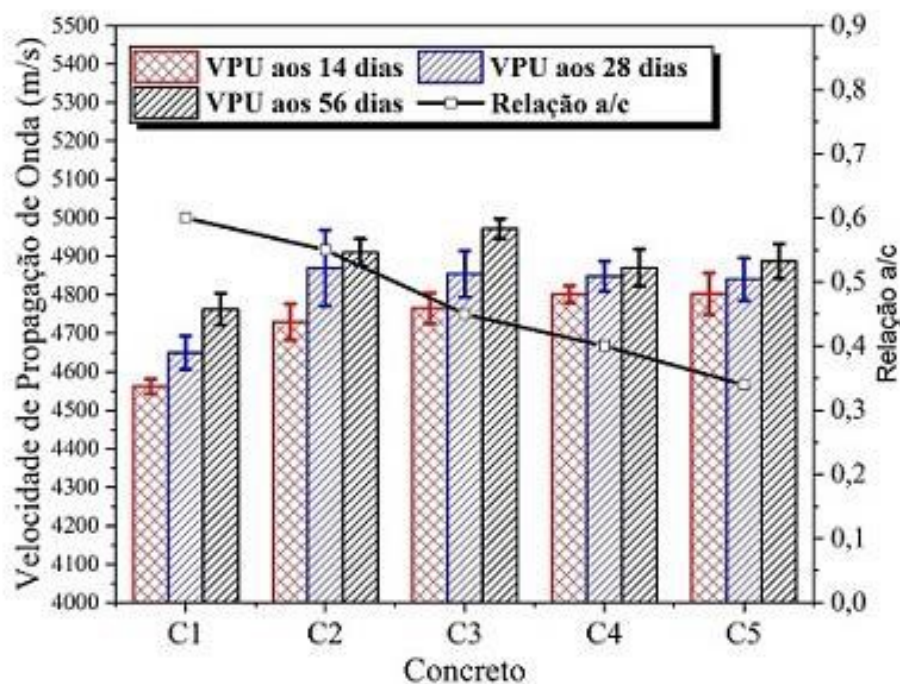
Resultados semelhantes foram encontrados por Camargo e Ferrari (2021) em seus estudos com o objetivo de apresentar parâmetros para a estimativa das propriedades mecânicas do concreto (resistência à compressão e módulo de elasticidade) por meio de ensaios não destrutivos. Dentre outros ensaios, usaram o método de propagação de ondas ultrassônicas e notaram que a mesma aumentava com a idade para cinco tipos de concretos com diferente relação água/cimento, conforme Figura 25.

Figura 24. Relação entre a velocidade de ultrassom e a idade do concreto



Fonte: Wang (2009).

Figura 25. Evolução da velocidade ultrassônica dos corpos de prova ao longo da idade



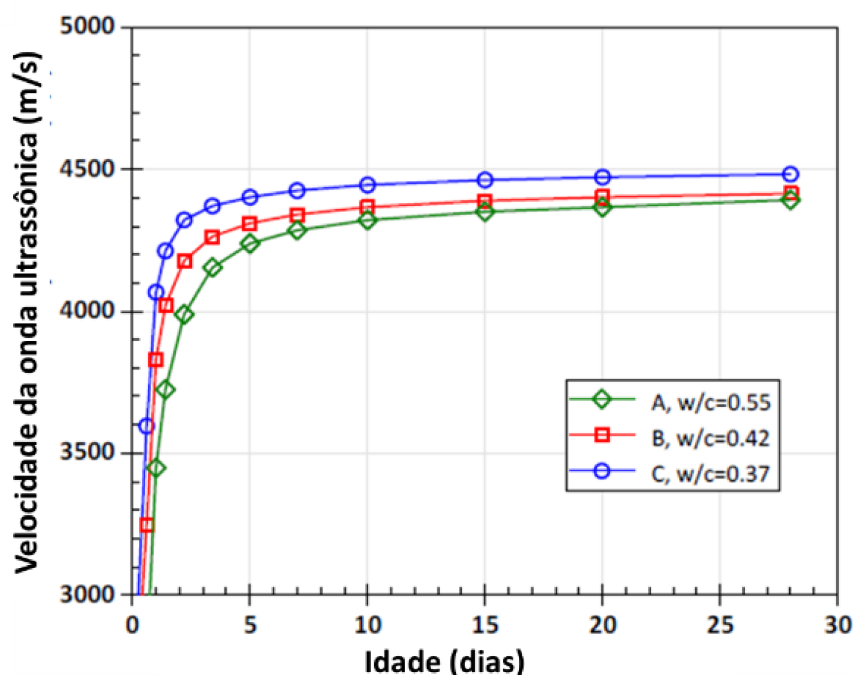
Fonte: Camargo e Ferrari (2021).

2.2.1.1.2 Relação água/cimento

A relação água/cimento tem efeitos sobre a resistência mecânica do concreto, ou seja, maior relação água/cimento gera maior porosidade e existe uma relação inversa entre porosidade e resistência do concreto. Do mesmo modo, existe também uma relação inversa entre a porosidade e o valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas diminui à medida que o valor da relação água/cimento aumenta e vice-versa (GOUEYGOU et al., 2009; ISAIAS et al., 2011; WANG et al., 2017; SAHA et al., 2021).

Tendo em vista estabelecer um modelo de previsão quantitativo para a velocidade de ondas ultrassônicas de materiais cimentícios, Jiang et al. (2022) observaram que, para concreto na mesma idade, a velocidade ultrassônica daqueles com uma relação água/cimento de 0,55 é menor, que se desenvolve para cerca de 4300 m/s em 28 dias. A velocidade ultrassônica do concreto com uma relação água/cimento de 0,37 é a mais alta, que finalmente se desenvolve para cerca de 4500 m/s, conforme Figura 26.

Figura 26. Relação entre a velocidade de ultrassom e idade do concreto



Fonte: Jiang et al. (2022).

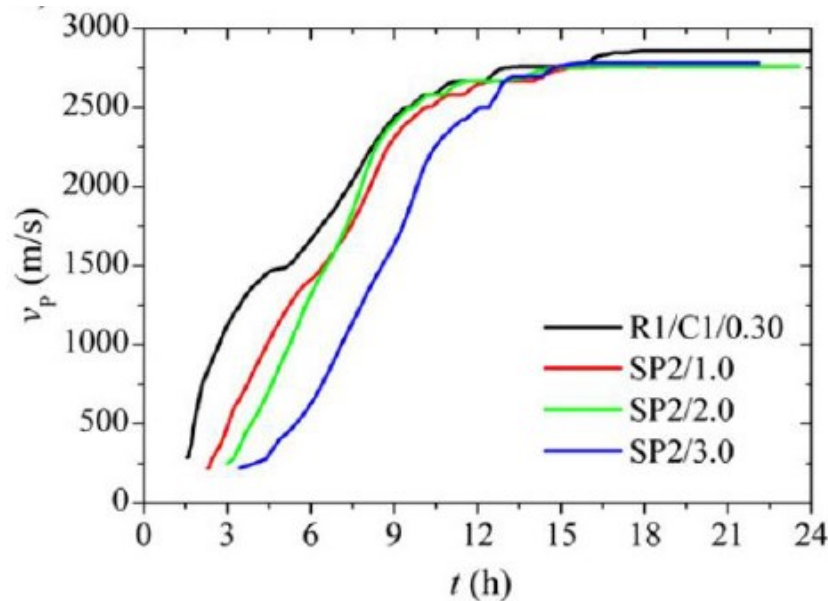
2.2.1.1.3 Uso de aditivos e adições

Diferentes aditivos e adições são usados para controlar as propriedades tecnológicas das misturas de concreto, bem como as propriedades físicas e mecânicas do concreto endurecido. O uso de aditivos e adições promove a minimização da porosidade capilar (responsável pela troca de umidade, íons e gases com o meio), aumentam a trabalhabilidade e aumenta a resistência mecânica do concreto endurecido (pois permitem o uso de menor relação água/cimento). O uso desses materiais, em alguns casos, aumenta a densidade do concreto em função do preenchimento dos vazios e, conseqüentemente, aumentam os valores medidos de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (ISAIAS et al., 2011; NAGROCKIENÈ et al., 2017; DIAB et al., 2019; SILVA et al., 2021).

Trtnik e Turk (2013) usaram o método de transmissão de ondas ultrassônicas para estudar a influência de aditivos superplastificantes na formação da estrutura de pastas de cimento em idades precoces (de 0 à 24 horas). Ao comparar os resultados obtidos em misturas contendo aditivo superplastificante de sulfonato naftaleno em 1% (SP2/1,0), em 2% (SP2/2,0) e 3% (SP2/3,0) com o obtido em mistura de referência sem aditivo e relação água cimento

(W/C) igual a 0,30 (R1/C1/0.30), a menor velocidade de propagação da onda foi encontrada nas pastas de cimento com aditivos ou superplastificadas, indicando, possivelmente, que os aditivos superplastificantes retardam a formação de uma rede sólida durante o processo de endurecimento da pasta, conforme se pode observar no gráfico da Figura 28.

Figura 27. Influência dos aditivos super plastificantes na velocidade de ultrassom

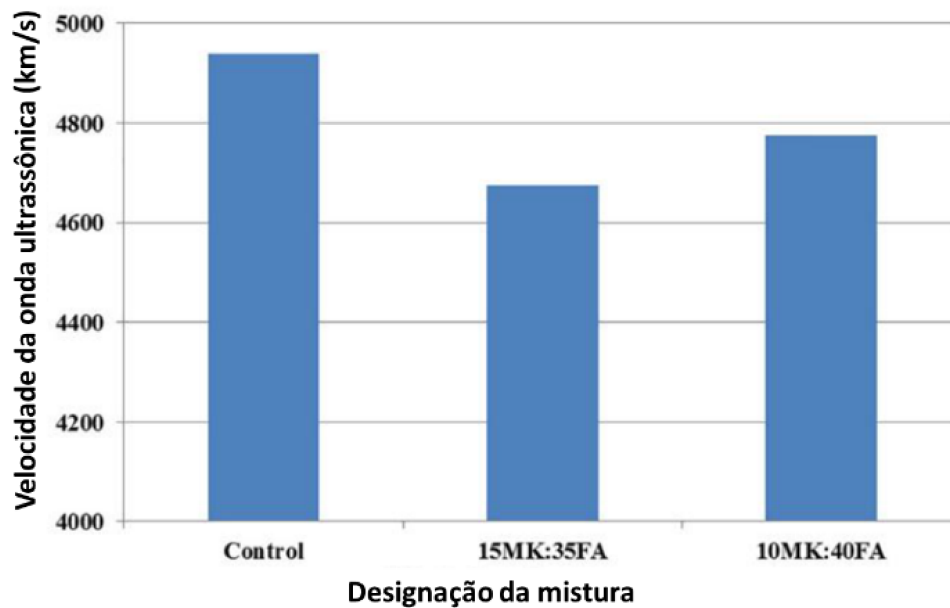


Fonte: Trtnik e Turk (2013) .

Pelo gráfico da Figura 27 também se pode observar que os valores de velocidade das ondas ao fim das 24 horas são muito semelhantes para todas as misturas contendo aditivo, independentemente da sua dosagem. Isto indica que o tipo e a dosagem de aditivos superplastificantes não tem efeito no processo de formação da fase sólida em idades mais avançadas.

Hasan et al. (2021), estudaram a combinação de adições como o metacaulim (MK) e cinza volante (FA) para substituir 50% do cimento no concreto. Para o alcance do objetivo, três misturas foram preparadas: 10MK + 40FA, 15MK + 35FA e a mistura de controle sem substituição. O efeito na velocidade de ultrassom das misturas contendo essas adições pode ser observado no gráfico da Figura 28.

Figura 28. Influência das adições na velocidade de ultrassom aos 91 dias



Fonte: Hasan et al. (2021).

Pelo gráfico da Figura 28 observa-se que os valores de velocidade de propagação das ondas na amostra de controle são mais alto do que em amostras com substituição de cimento. E amostras contendo baixo nível de metacaulim (MK) e alto de cinza volante (FA), produz resultados mais altos de velocidade de ultrassom. Com base nos resultados obtidos nesse estudo, os valores de velocidade para todas as misturas foram superiores a 4000 m/s e assim ambas as misturas podem ser consideradas como tendo boa qualidade.

2.2.1.1.4 Tipo de agregado

Os agregados compõem cerca de $\frac{3}{4}$ do volume do concreto. A alteração do tipo de agregado no concreto altera significativamente a sua microestrutura. À medida que a velocidade ultrassônica dos agregados aumenta, a resistência à compressão final do concreto aumenta, ou seja, o concreto contendo os agregados mais fortes e densos, tem maior velocidade de onda ultrassônica (ISAIAS et al., 2011; MOHAMMED; MAHMOOD, 2016; MOHAMMED; RAHMAN, 2016; HASANNEJAD et al., 2021; KIM et al., 2022).

Mohammed e Rahman (2016) estudaram o efeito do tipo de agregado na variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto. Os tipos de agregados usados foram lascas de tijolo, pedra britada, pedra redonda e pedra preta. Os resultados da variação da

velocidade da onda aos 28 dias para concretos feitos com lascas de tijolo, pedra britada e pedra redonda, são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Gama de velocidade de ultrassom de concretos feitos com diferentes agregados.

Tipo de agregado	Velocidade de ultrassom do concreto (m/s)
Lascas de tijolo	3290 – 3660
Pedra britada	4273 – 4395
Pedra redonda	4326 – 4601

Fonte: Adaptado de Mohammed e Rahman (2016).

O menor valor de velocidade da onda é encontrado em concretos feitos com agregados de lascas de tijolo e o maior valor da velocidade da onda são encontrados em concretos feitos com agregados de pedra redonda. Com base no Quadro 1, as lascas de tijolo tiveram a maior absorção e menor peso unitário, isto indica maior quantidade de poros. Esses poros reduzem o valor medido da velocidade de onda a medida que ela atravessa a amostra de concreto. Sendo assim, concretos confeccionados agregados com maior absorção e menor peso unitário apresentam menores valores de velocidade de onda ultrassônica.

Quadro 1. Propriedades físicas dos agregados investigados

Tipo de agregado	Módulo de finura	Desgaste (%)	Absorção (%)	Peso unitário (kg/m ³)
Lascas de tijolo	De cordo com a ASTM C 33	38,26	15,6	1236
Pedra britada		38,76	2,39	1549
Pedra redonda		27,3	1,16	1671

Fonte: Adaptado de Mohammed e Rahman (2016).

A velocidade da onda de concreto feito com pedra em forma redonda foi um pouco melhor em comparação com a velocidade da onda de concreto feito com pedra britada. Isto

porque a pedra em forma redonda pode ser julgada como relativamente mais densa em comparação com a pedra britada em função dos valores de absorção e massa unitária conforme se observa no Quadro 1. De modo resumido o estudo permitiu observar que a velocidade da onda ultrassônica de concretos feitos com pedra redonda >pedra britada>lascas de tijolo.

Hasannejad et al. (2021) examinaram a velocidade da onda ultrassônica de concretos preparados com diferentes tipos de agregados: sílica, dolomite, calcário e granito, em diferentes idades. O Quadro 2 apresenta as propriedades físicas dos agregados usados no estudo e os resultados da variação da velocidade da onda em função da variação do tipo de agregados, são apresentados na Figura 30. O aumento da velocidade da onda está relacionado à porosidade do concreto, e a menor porosidade do concreto produz aumento da velocidade da onda.

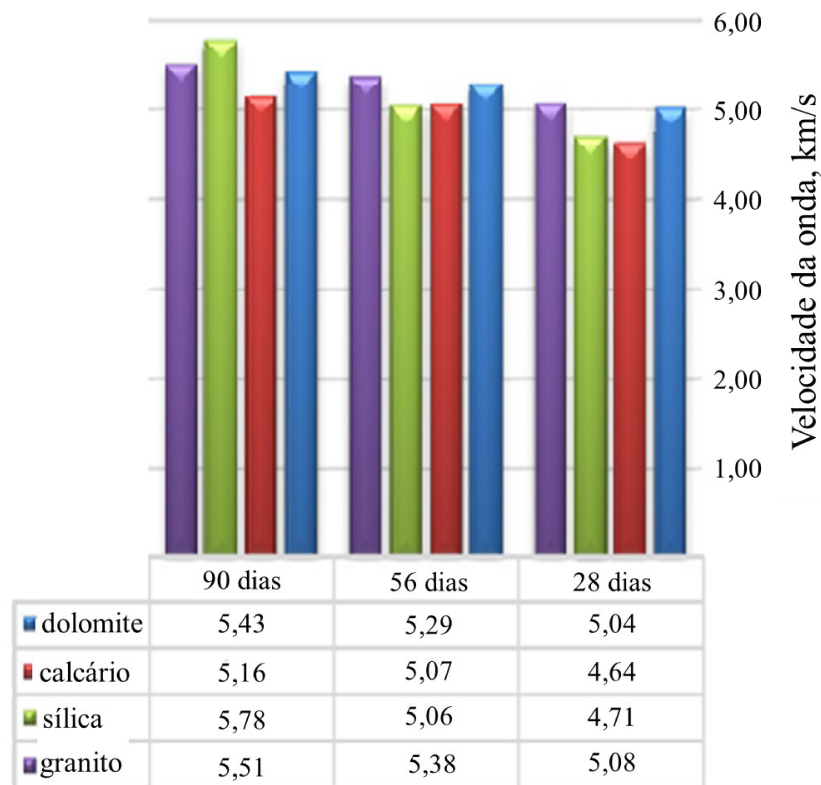
Quadro 2. Características físicas dos materiais rochosos utilizados

Tipo de agregado	Resistência à compressão (kg/cm ²)	Massa específica (kg/cm ³)	Absorção (%)
Dolomítico	840	1736	3,8
Calcário	540	1565	11,8
Granítico	930	1902	2,75
Silicioso	890	1832	3,5

Fonte: Hasannejad et al. (2021).

Na Figura 29 observa-se que, aos 90 dias, mudar o tipo de agregado altera a velocidade da onda, ou seja, o concreto contendo os agregados mais fortes tem uma maior velocidade de onda ultrassônica. O concreto feito de agregados contendo granito e sílica tem uma velocidade de onda mais alta. Em contrapartida, o aumento do valor da absorção de concretos contendo agregados calcáreos e dolomíticos reduziu a velocidade da onda.

Figura 29. Velocidade de ultrassom de concretos com diferentes tipos de agregados



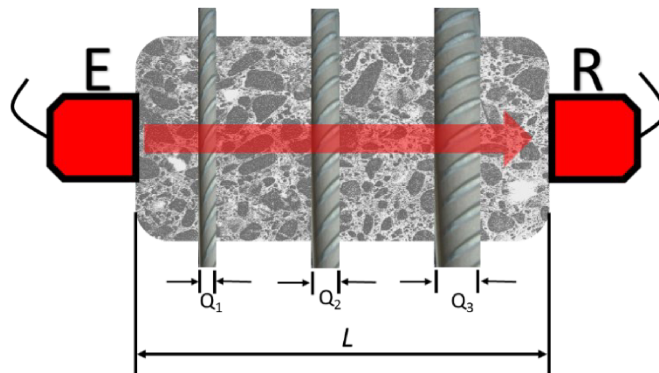
Fonte: Hasannejad et al. (2021).

2.2.1.1.5 Presença de armadura

As armaduras presentes na massa do concreto afetam o valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, ou seja, as medições efetuadas nas proximidades das barras da armadura são geralmente maiores do que em concreto simples nas mesmas composições. Isso acontece porque o valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no aço pode ser até o dobro do valor medido no concreto e em determinadas situações, a onda emitida pelo transdutor emissor viaja parcialmente no concreto e parcialmente no aço (MALHOTRA, CARINO, 2004; KENCANAWATI et al., 2018). O aumento da velocidade de propagação das ondas depende da proximidade das medições às barras da armadura, do diâmetro da barra, número de barras e sua orientação em relação ao caminho de propagação das ondas ultrassônicas. Quando as medições do valor da velocidade de propagação são afetadas pelas barras da armadura, devem ser usados fatores de correção a fim de se evitar equívocos na apuração dos resultados (FODIL et al., 2019; SALAH et al., 2021).

Em relação a influência das barras da armadura, Malhotra e Carino (2004) afirmam que se houver n barras com diferentes diâmetros Q_i ($i = 1$ a n) diretamente no caminho da onda, com seus eixos perpendiculares ao caminho de propagação (ver Figura 30), a velocidade da onda pode ser calculada assumindo que a onda atravessa o diâmetro total de cada barra durante sua trajetória e que pode ser expressa pela equação 2.

Figura 30. Armaduras na posição perpendicular à propagação da onda



Fonte: adaptado de Malhotra e Carino (2004).

$$\frac{V_c}{V} = 1 - \frac{L_s}{L} \left(1 - \frac{V_c}{V_s} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde: V é a velocidade de propagação da onda medida no concreto armado; V_c é a velocidade de propagação da onda no concreto simples em m/s; V_s velocidade da onda no aço em m/s; L é o comprimento total do percurso (distância entre os transdutores) em m; $L_s = \sum_1^n Q_i$ é o comprimento do caminho através do aço em m.

Os valores de $\frac{V_c}{V}$ (coeficiente de correção) da equação 2 são apresentados na Tabela 2 para diferentes comprimentos do caminho no aço em três tipos de concretos, que podem ser classificados como material de qualidade baixa, razoável e boa, respectivamente. Observa-se que quanto maior a taxa de armadura, maior é a influência causada na velocidade da onda. Como exemplo temos que para um concreto de qualidade razoável onde a onda tenha percorrido um percurso L , em que 25% deste percurso contém barras de armadura (comprimento L_s), a velocidade da onda sem armadura é 92% da velocidade da onda com armadura.

Segundo FODIL et al., (2019), a influência da armadura na posição perpendicular às medições da velocidade da onda depende da taxa de armadura (L_s/L) do elemento estrutural. Isto implica que, para elementos estruturais levemente armado (taxa de armadura $< 1\%$) o valor

de V_c/V é muito próximo de 1 e o valor medido da velocidade de propagação da onda é semelhante ao do concreto simples (sem armadura). Ao aumentar a taxa de armadura, o valor de V_c/V diminui da unidade, mas ainda pode ser desprezado para uma taxa de armadura de 3%.

Tabela 2. Coeficiente de correção da influência do aço na direção perpendicular à onda

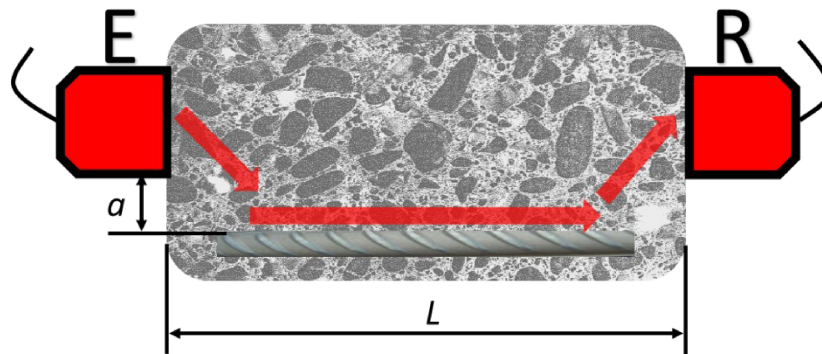
$\frac{L_s}{L}$	%	Fator de correção em função da qualidade do concreto		
		$\left(\frac{V_c}{V} = \frac{\text{Velocidade da onda no concreto simples}}{\text{Velocidade da onda no concreto armado}} \right)$		
		Baixa $V_c = 3000 \text{ m/s}$	Razoável $V_c = 4000 \text{ m/s}$	Boa $V_c = 5000 \text{ m/s}$
1/12	8,33	0,96	0,97	0,99
1/8	12,50	0,94	0,96	0,98
1/6	16,66	0,92	0,94	0,97
1/4	25	0,88	0,92	0,96
1/3	33,33	0,83	0,89	0,94
1/2	50	0,75	0,83	0,92

Fonte: Malhotra e Carino (2004).

A influência da armadura na direção perpendicular à propagação da onda aumenta à medida que a taxa de armadura também aumenta, ou seja, para uma alta taxa de armadura de 8% o valor de V_c/V foi de 0,982, para taxa de 3% o valor de V_c/V foi de 0,990 e para taxa de 0,56% o valor de V_c/V foi de 0,990. SABBAĝ et al., (2017), afirmam que a presença da armadura no concreto tende a aumentar a velocidade de propagação da onda desde que haja uma boa aderência entre o concreto e a armadura. Caso contrário, haverá uma redução da velocidade de propagação da onda.

Em relação a influência das barras da armadura quando estão dispostas na posição paralela à direção de propagação da onda, se a borda da barra estiver localizada a uma distância \underline{a} da linha que une os pontos mais próximos dos dois transdutores (emissor e receptor) e o comprimento do caminho entre os transdutores é L , conforme Figura 31, então o tempo T de trânsito da onda é dado pela equação 3 (MALHOTRA e CARINO 2004; LENCIS et al., 2011).

Figura 31. Armaduras na posição paralela à propagação da onda



Fonte: adaptado de Malhotra e Carino (2004).

$$T = \frac{L}{V_s} + 2a \times \sqrt{\frac{V_s^2 - V_c^2}{V_s \times V_c}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: T é o tempo de trânsito da onda ultrassônica em segundo (s); a é a distância da linha que une os pontos mais próximos dos dois transdutores em relação à armadura em metros (m); V_c é a velocidade de propagação da onda no concreto simples em m/s; V_s velocidade da onda no aço em m/s; L é o comprimento total do percurso (distância entre os transdutores) em metros.

A influência da armadura é considerada para valores de a/L conforme equação 4, caso contrário, segundo equação 5, a influência pode ser desprezada.

$$\frac{a}{L} \leq \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}} \quad \text{Equação 4}$$

$$\frac{a}{L} > \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{V_s - V_c}{V_s + V_c}} \quad \text{Equação 5}$$

Os valores de $\frac{V_c}{V_s}$ (coeficiente de correção) para equação 3 são apresentados na Tabela 5. para diferentes relações entre velocidade no concreto e velocidade no aço, e para diferentes posicionamentos dos transdutores em relação à barra na posição paralela à propagação da onda.

Na Tabela 3 observa-se que quanto menor for o valor de a , maior tende a ser a influência da armadura na velocidade de propagação da onda. Como exemplo temos que para $a=0$ o valor de V (velocidade da onda no concreto armado) é máximo para todas as condições

de $\frac{V_c}{V_s} = 0,90$ e quando a atinge valor na ordem de $0,14L$ a influência da armadura torna-se desprezível.

Tabela 3. Coeficiente de correção da influência do aço na direção paralela à onda

$\frac{a}{L}$	Fator de correção			
	$\left(\frac{V_c}{V} = \frac{\text{Velocidade da onda no concreto simples}}{\text{Velocidade da onda no concreto armado}} \right)$			
	$\frac{V_c}{V_s} = 0,90$	$\frac{V_c}{V_s} = 0,80$	$\frac{V_c}{V_s} = 0,71$	$\frac{V_c}{V_s} = 0,60$
0	0,90	0,80	0,71	0,60
1/20	0,94	0,86	0,78	0,68
1/15	0,96	0,88	0,80	0,71
1/10	0,99	0,92	0,85	0,76
1/7	1,00	0,97	0,91	0,83
1/5	1,00	1,00	0,99	0,92
1/4	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Malhotra e Carino (2004).

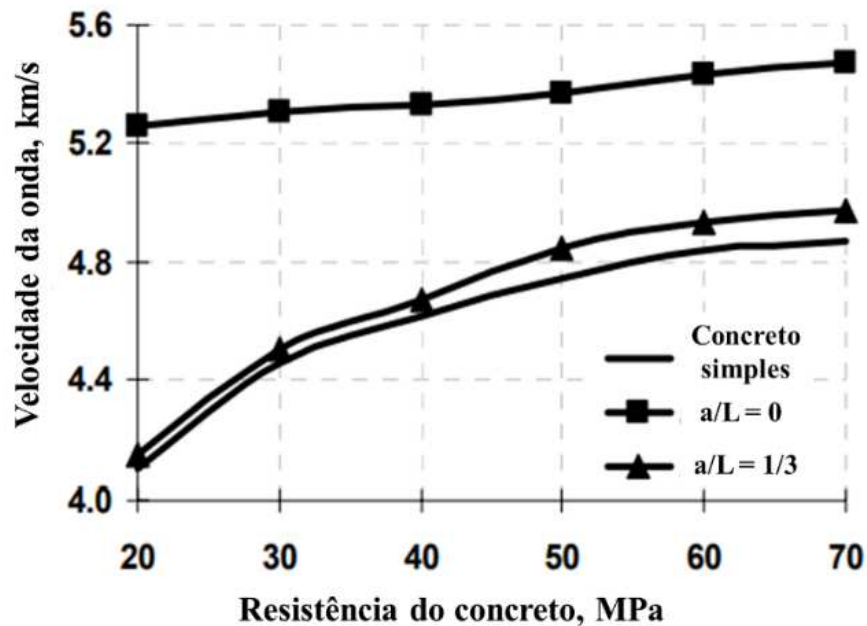
O valor da velocidade de propagação da onda ultrassônica em concretos com armaduras dispostas na posição paralela em relação à direção de propagação da onda é maior do que em concreto simples com a mesma composição (ASTM C 597, 2016; FODIL et al., 2019).

O estudo realizado por Lencis et al., (2011) mostrou que a presença de armadura no concreto reduziu o valor medido da velocidade de propagação da onda. Isto implica que o valor da velocidade de propagação da onda, medido no concreto simples, foi maior do que no concreto com armadura. Para corpos de prova de concreto armado com armadura de diâmetro (\emptyset) 22 mm a diminuição da velocidade da onda nas zonas dos vergalhões foi de até 7%. Para outros corpos de prova as diminuições foram as seguintes: \emptyset 16 mm diminuição de 4,7%, \emptyset 12 mm diminuição de 3,7%, \emptyset 8 mm diminuição de 2,7% e \emptyset 6 mm diminuição de 2,4%. Estes valores indicaram que o menor diâmetro da armadura, ocasiona a uma menor diferença entre o valor medido na zona da armadura e em concreto simples. Segundo o autor, a redução no valor medido da velocidade de propagação da onda pode estar relacionada tanto com as diferentes propriedades do concreto na zona de transição e da pasta de cimento hidratada – barras da

armadura por causa da porosidade, quanto com a diferença na concentração de agregados graúdos ao redor da armadura, por causa da compactação do concreto por vibração.

O estudo realizado por Risan et al., (2017) mostrou que a velocidade da onda no concreto armado é geralmente maior do que no concreto simples de mesma composição conforme Figura 32.

Figura 32. Velocidade da onda em concretos com armadura na direção paralela



Fonte: Risan et al., (2017).

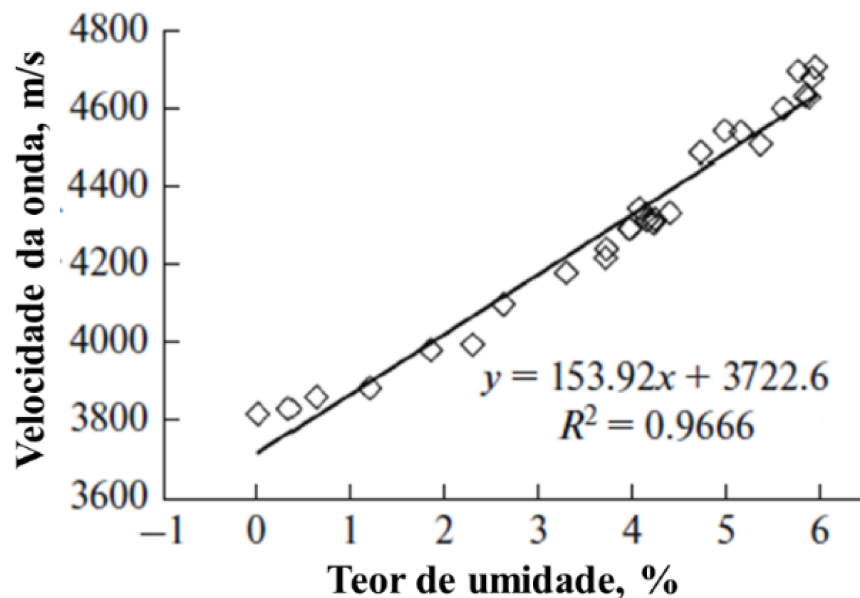
No gráfico da Figura 32 pode-se notar que quando o eixo da armadura é colocado na mesma linha que os transdutores ($a/L = 0$), o valor da velocidade da onda é semelhante ao valor da velocidade da onda no aço (5,4 – 6,0 km/s). E quando se desloca o eixo da barra em relação a linha dos transdutores, o valor da velocidade de propagação da onda se aproxima do valor medido em concreto simples.

2.2.1.1.6 Umidade do concreto

O ingresso de água no concreto tende a causar aumento da velocidade da onda ultrassônica porque o som se propaga com maior velocidade na água do que nos poros vazios do concreto (NORHASRI et al., 2021). Em seu estudo, Güneyli et al. (2017) ensaiando corpos de prova de concreto com diversos teores de umidade variando de completamente saturado com

água ao estado seco, observaram que a velocidade da onda aumenta como uma função única para cada corpo de prova com um teor de água crescente conforme pode ser observado no gráfico da Figura 33.

Figura 33. Correlação entre velocidade da onda e teor de umidade



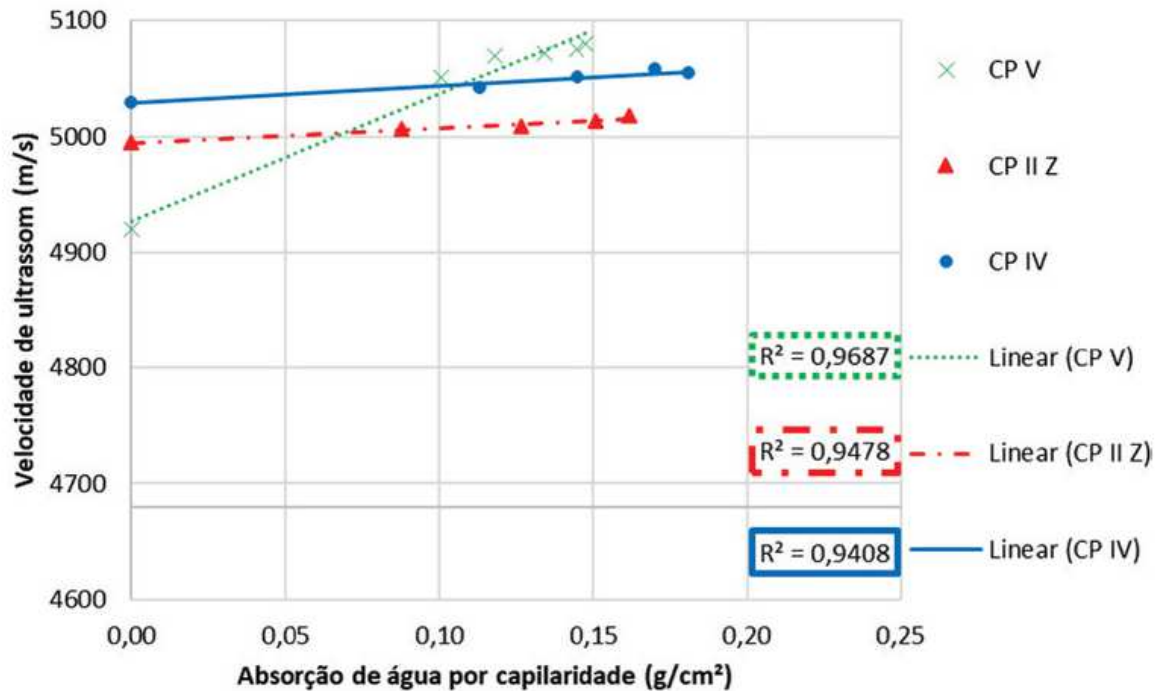
Fonte: Güneyli et al. (2017).

Pelo gráfico da Figura 33 observa-se que houve uma correlação linear entre a velocidade da onda e o teor de umidade com valor de R^2 na ordem de 0,97 indicando assim a existência de uma forte relação entre o aumento da velocidade da onda pelo aumento do teor de umidade no concreto. Um aumento adicional no teor de água de 1% aumenta a velocidade da onda entre 120 e 190 m/s (média de 160 m/s).

Godinho et al. (2020) também verificaram que existe influência com relação direta entre o ingresso de água no concreto e os valores de velocidade da onda ultrassônica. Os autores, com base na no gráfico da Figura 34, apresentaram os resultados da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas e absorção de água por sucção capilar ao longo de 72 h para concretos preparados com três tipos de cimento na idade de 91 dias de cura. Pode observar-se que a magnitude de aumento na velocidade da onda ao longo do ensaio de absorção por capilaridade foi pequena. E isso ocorreu devido às características do ensaio que envolve a penetração de pequena quantidade de água no concreto. Houve uma correlação linear entre a velocidade da onda e a absorção de água por capilaridade com todos os valores de R^2 acima 0,90, o que indica, possivelmente, que existe influência com relação direta entre o ingresso de água no concreto e

os valores da velocidade de propagação da onda ultrassônica, ou seja, o ingresso da água no concreto aumenta o valor da velocidade de propagação da onda.

Figura 34. Correlação entre a velocidade da onda e a absorção por capilaridade



Fonte: Godinho et al. (2020).

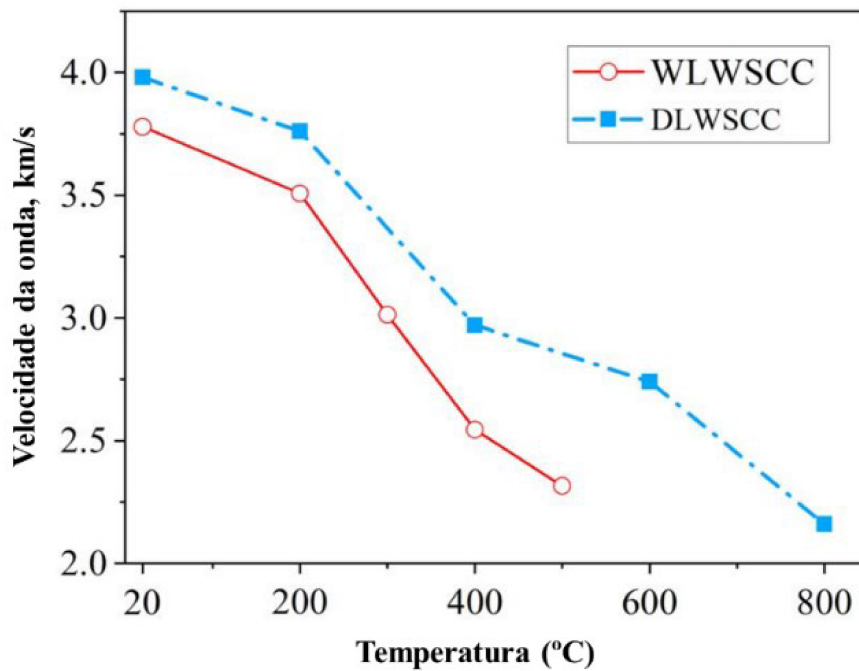
2.2.1.1.7 Temperatura do concreto

As altas temperaturas, como em caso de incêndios, alteram a estrutura microscópica do concreto e, posteriormente, levam a danos internos. Com isso, a resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à tração e o módulo de elasticidade do concreto, diminuem (ROUFAEL et al., 2021). Temperaturas na ordem de 80 °C provocam a evaporação da água livre do concreto, dando origem ao aumento da quantidade de microporos na massa de concreto e conseqüentemente, o surgimento de trincas internas e superficiais que reduzem o valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (METHA E MONTEIRO, 2014; TANYILDIZI E SAHIN, 2015; DESHPANDE et al., 2019; WU et al., 2022; ALMASAEID et al., 2022).

Em seu estudo sobre as propriedades mecânicas e os mecanismos de danos de concretos de ceramsite de xisto (LWSCC - concreto com granulados de cerâmica de xisto) submetido a altas temperaturas, Wu et al., (2022) submeteram a altas temperaturas dois grupos

de concreto LWSCC. posteriormente, analisaram o efeito da alta temperatura na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas das amostras ensaiadas, sendo o grupo 1 - LWSCC úmido (WLWSSC), com teor de umidade de 4,1% e submetido a temperaturas selecionadas de 20, 200, 300, 400, 500 e 600 °C; o grupo 2 – LWSCC seco (DLWSSC) e submetido a temperaturas selecionadas de 20, 200, 400, 600 e 800 °C, de acordo com a Figura 35.

Figura 35. Relação entre a velocidade da onda ultrassônica e temperatura



Fonte: Wu et al. (2022).

No gráfico da Figura 35, podemos observar que quando a temperatura aumenta, a velocidade de propagação da onda diminui gradativamente. Acima de 200 °C a diminuição é mais acentuada (para os dois grupos), possivelmente, devido à evaporação da água livre no concreto, expansão dos poros e conseqüente surgimento de fissuras. Os autores concluíram que o aumento da temperatura pode causar a redução da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas no concreto.

No caso de baixas temperaturas como em situações de congelamento, a velocidade da onda tende a ser maior por conta da água congelada em seu interior, mas variações ambientais de temperatura na ordem de 10 e 30 °C não causam mudanças significativas sem a ocorrência de mudanças correspondentes na resistência mecânica ou propriedades elásticas do concreto (IAEA, 2002; TARANGINI et al., 2022). Na Tabela 4 são indicados os valores de

correção da velocidade da onda para determinados valores de temperatura fora do intervalo acima referido.

Tabela 4. Efeito da temperatura na velocidade da onda ultrassônica

Temperatura	Correção dos valores de velocidade da onda	
	Concreto seco ao Ar	Concreto saturado com água
°C	%	%
60	+5	+4
40	+2	+1,7
20	0	0
0	-0,5	-1
-4	-1,5	-7,5

Fonte: IAEA, (2002).

2.2.1.1.8 Condições de cura

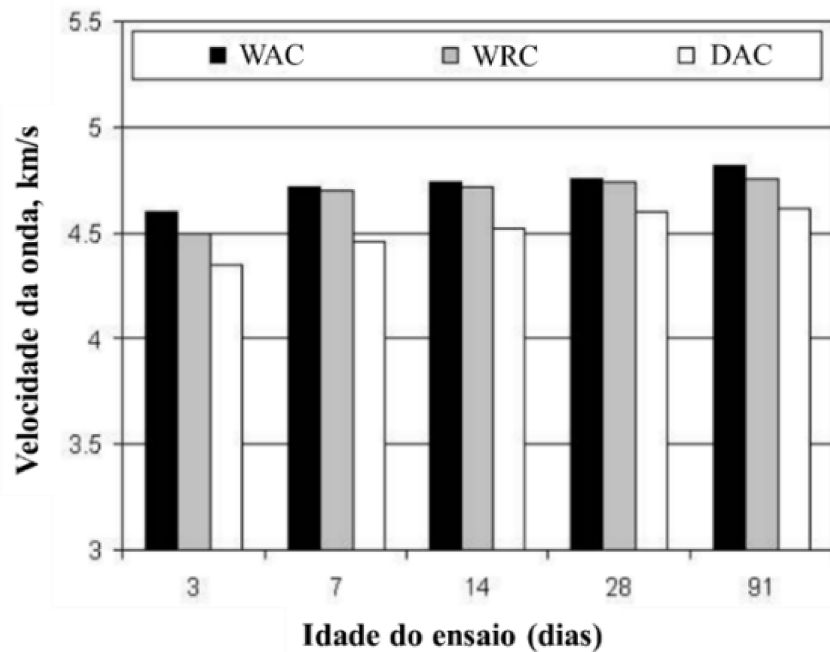
A velocidade ultrassônica diminui à medida que o nível de umidade durante o período de cura diminui. A cura do concreto está associada ao desenvolvimento de mudanças microestruturais que levam ao desenvolvimento de uma rede de poros capilares característicos ao tipo de cura (seca ou úmida). Uma cura adequada mantém um ambiente adequadamente quente e úmido para o desenvolvimento de produtos de hidratação, reduzindo assim a porosidade da pasta de cimento hidratada e aumentando a densidade da microestrutura do concreto (SAFIUDDIN et al., 2007; ISAIAS et al., 2011; ESTÉVEZ et al., 2020; XU et al., 2020; HERKI, 2020; HONG et al., 2021).

Em seus estudos, Safiuddin et al. (2007) analisaram o efeito do modo de cura na velocidade de propagação da onda ultrassônica. Foram usados os modos de cura com água (WAC) onde os corpos de prova foram imersos em água, cura envolta (WRC) onde os corpos de prova foram envolvidos em poli-filme e a cura ao ar seco (DAC) onde os corpos de prova foram expostos ao ar seco. A temperatura utilizada foi de 20 ± 2 °C para os três modos de cura. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 36.

Pelo gráfico da Figura 36 observa-se que a cura com água produziu o nível mais alto de velocidade da onda. A cura com água, possivelmente, deu origem à formação de uma matriz do concreto mais densa devido à melhoria no processo de hidratação do cimento. A cura

envolta forneceu uma velocidade de onda mais alta do que a cura ao ar seco, mas menor do que a cura com água.

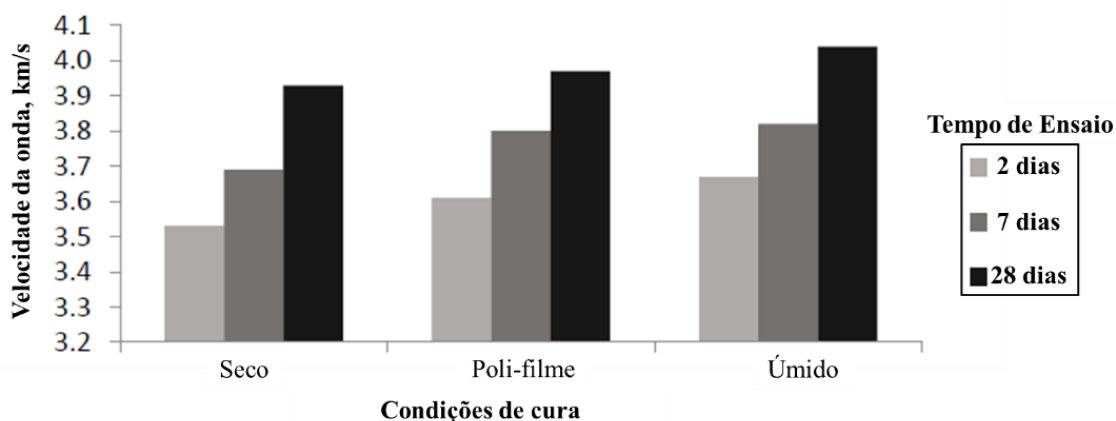
Figura 36. Efeito do modo de cura na velocidade de ultrassom



Fonte: Safuiddin et al. (2007).

Em contraste, a cura com ar seco forneceu o nível mais baixo de velocidade de onda, possivelmente porque o movimento da umidade dos corpos de prova de concreto foi muito alto, o que não forneceu nenhuma proteção contra a secagem precoce do concreto e isso afetou o processo de hidratação do concreto. Resultados semelhantes foram encontrados por Herki (2020), conforme gráfico da Figura 37. De acordo com a mesma, nota-se que a cura úmida foi a melhor entre as três condições de cura.

Figura 37. Efeito do modo de cura na velocidade de ultrassom



Fonte: Herki (2020).

2.2.1.2 Aplicações do método de ensaio de ultrassom

2.2.1.2.1 Determinação da resistência à compressão

O método de ultrassom é utilizado na avaliação da resistência à compressão do concreto tanto em laboratório como em campo (*in situ*). Ele é um método abrangente, que fornece informações tanto sobre o módulo de elasticidade quanto sobre os parâmetros de classificação (composições e densidades) do material investigado (HANNACHI; GUETTECHE, 2014; CAMARGO; FERRARI, 2021). Embora não haja relação direta entre a resistência à compressão do concreto e a velocidade da onda ultrassônica, a resistência pode ser avaliada estabelecendo correlações prévias (FERRARI; MANTOVANI, 2020; PORTELLA et al., 2021; OFUYATAN et al., 2021).

Hobbs e Kebir (2007), em laboratório, avaliaram a resistência à compressão de cubos de concreto com 150 mm de lado com o estabelecimento de correlações com a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas conforme Figura 38.

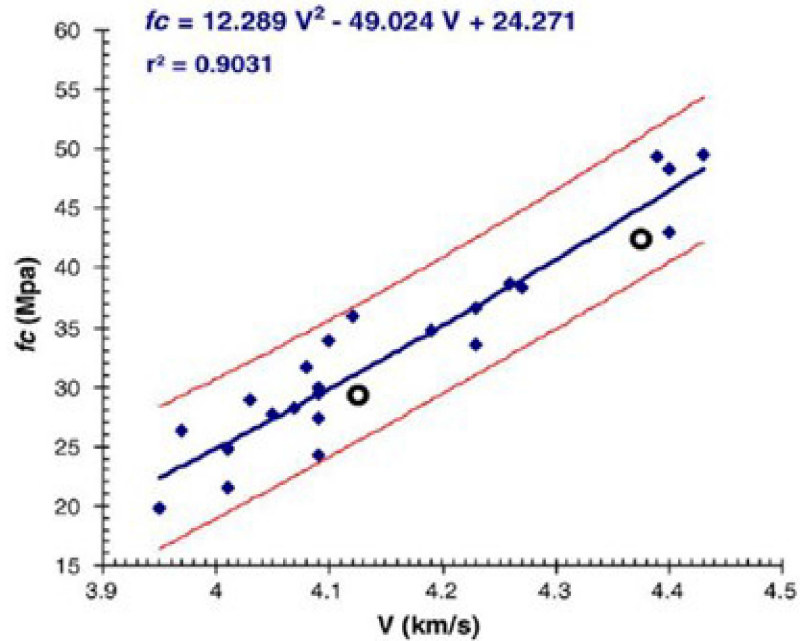
Segundo os autores acima citados, apesar da boa representatividade da curva ($R^2 = 0,90$), o uso apenas do método de velocidade de pulso ultrassônico não é apropriado para estimar a resistência do concreto. Sendo assim, recomendam o uso de métodos combinados para que se tenha resultados mais confiáveis.

Lee et al., (2020) usaram o método de velocidade de ultrassom correlacionando-o com a resistência à compressão de amostras de concreto com diferentes razões água/cimento (a/c), a fim de determinar o tempo necessário para remoção das formas em campo. A curva de

correlação na Figura 39 apresenta a estimativa da resistência de concreto em idades precoces através do uso da velocidade de ultrassom.

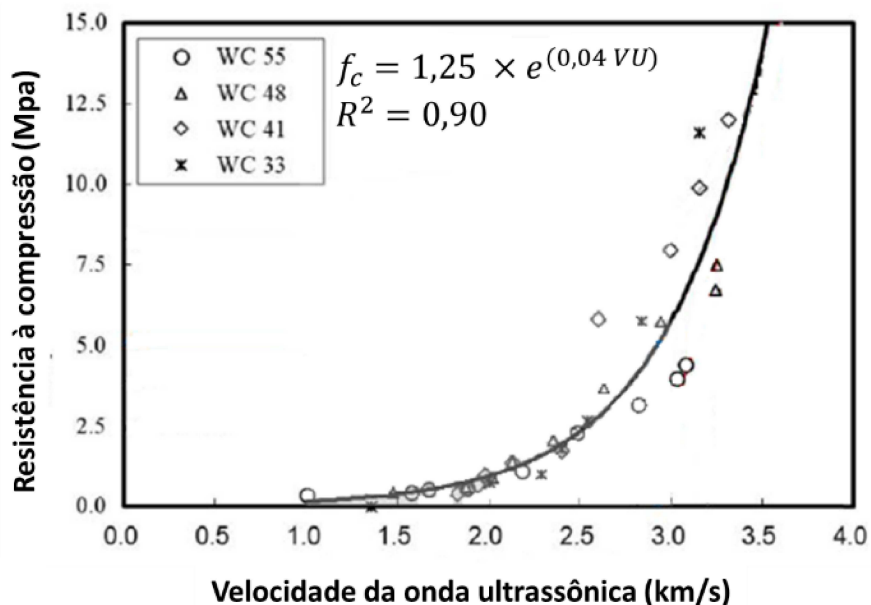
Segundo os autores, a correlação apresentou confiabilidade suficiente ($R^2 = 0,90$) quando usada para estimativa da resistência à compressão do concreto em idades precoces.

Figura 38. Correlação entre velocidade de ultrassom e resistência a compressão



Fonte: Hobbs e Kebir (2007).

Figura 39. Resistência à compressão através da velocidade de ultrassom



Fonte: Adaptado de Lee et al., (2020).

2.2.1.2.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

No projeto de estruturas, o módulo de elasticidade do concreto é um parâmetro fundamental na estimativa da deformação de um elemento estrutural em condições de serviço. O módulo estático é determinado através de ensaios mecânicos, nos quais a tensão aplicada está relacionada com o deslocamento do corpo de prova dentro da região de deformação elástica (ISAIAS et al., 2011; POKORNY et al., 2016; THOMAZ et al., 2021). O módulo de elasticidade dinâmico é definido pela razão tensão-deformação sob condições vibratórias e é utilizado principalmente para avaliar a solidez do concreto em ensaios de durabilidade, é utilizado no cálculo de estabilidade de estruturas sujeitas a carregamento dinâmico (LEE et al., 2017; BOLBOREA et al., 2021). O método de propagação de ondas ultrassônicas tem sido utilizado na determinação do módulo de elasticidade dinâmico. A utilização tem sido feita conforme a equação 6 contida norma americana ASTM C 597 (2016) que correlaciona a velocidade de propagação da onda com o módulo de elasticidade dinâmico do concreto. O módulo de elasticidade dinâmico foi assumido como sendo o módulo tangente inicial em tensão zero determinado no teste padrão porque apenas tensão insignificante é aplicada durante a medição da velocidade de onda ultrassônica.

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: V é a velocidade de propagação da onda em m/s; ρ é a massa específica do concreto em kg/m³; μ é o coeficiente de Poisson e E_d é o módulo de elasticidade em GPa.

2.2.1.2.3 Tomografia ultrassônica

A tomografia ultrassônica é um método de ensaio não destrutivo que possibilita o mapeamento de uma seção interna de uma estrutura a partir de múltiplas projeções para identificação de descontinuidades. A tomografia ultrassônica melhora o processo de interpretação dos resultados de ensaios ultrassônicos convencionais, pois permite visualizar o comportamento interno da estrutura através da criação de imagens fatiadas. Essas imagens são chamadas de “tomograma” por meio da combinação de várias medições, que permitem a identificação de localizações, forma e tamanho das descontinuidades do material (HAACH; RAMIREZ, 2016; PERLIN; PINTO, 2019; NIU et al., 2021; WANG et al., 2022).

Behnia et al. (2014) avaliaram o desenvolvimento de fissuras em vigas através do uso de tomografia ultrassônica. De acordo com a Figura 40, a falha da estrutura foi manifestada por propagação de fissuras de flexão e desenvolvimento de cisalhamento crítico com fissuras na parte posterior ao carregamento (parte inferior da viga). Também foi observado fissuras leves devido à força de compressão no lado superior da viga, nas proximidades dos pontos de carregamento.

Figura 40. Padrão de falha da viga ensaiada na carga máxima

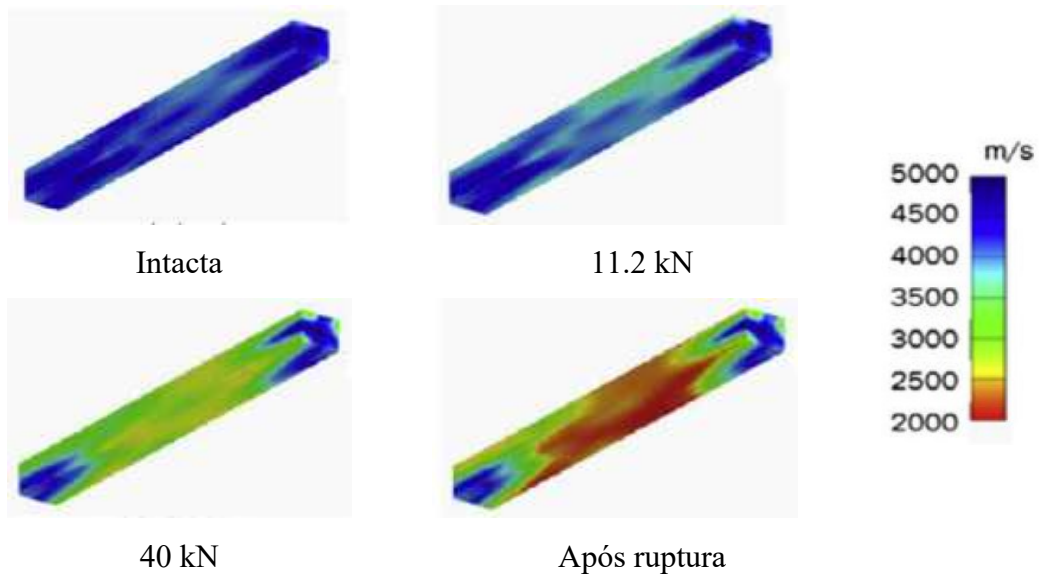


Fonte: Behnia et al. (2014).

O tomograma obtido está representado na Figura 41, onde se pode observar que antes do carregamento a viga estava intacta e apresentava valores de velocidade de ultrassom superiores a 4000 m/s, um valor aproximado de referência para concreto com qualidade. Com o início do carregamento, houve queda no valor da velocidade à medida que os danos aumentavam, sendo que após a ruptura da viga os valores de velocidade fixaram-se abaixo de 2500 m/s, em particular na seção da viga próximo ao meio vão onde as trincas críticas foram observadas.

Choi et al. (2016) utilizaram a tomografia ultrassônica para avaliar fissuras e delaminações do concreto em pilares de pontes, conforme Figura 42a que mostra a condição dos pilares com exposição de aço na parte inferior e favo de mel (nicho de concretagem) na parte frontal. A Figura 42b mostra o modo de execução do ensaio com o eixo Z mostrando uma direção de profundidade a partir da superfície. Os tomogramas resultantes do ensaio encontram-se nas Figuras 42c e 42d.

Figura 41. Mapeamento da velocidade da onda em diferentes níveis de danos



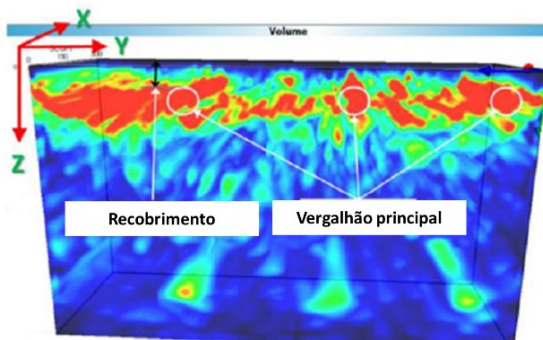
Fonte: Behnia et al. (2014).

Figura 42: Avaliação de rachaduras e delaminações com tomografia ultrassônica.

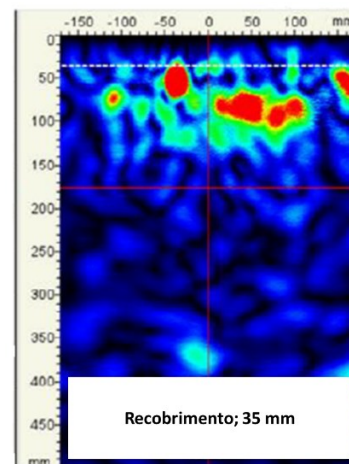


a) condição do píer daponte

b) execução do ensaio



c) tomograma de análise;



d) tomograma de análise do recobrimento

Fonte: Choi et al. (2016).

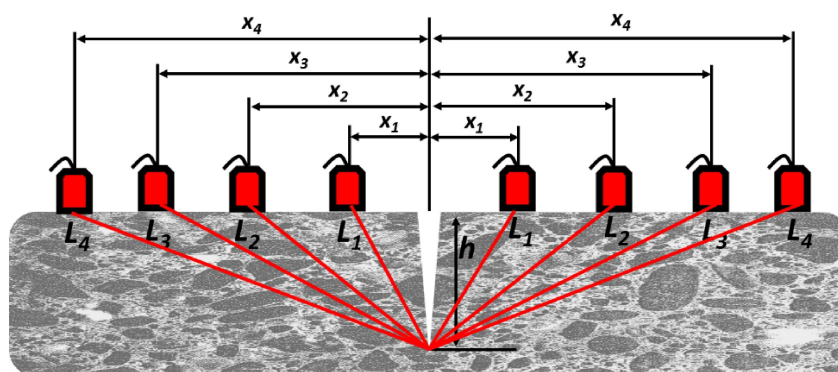
Conforme os autores, através do tomograma foi possível detectar o recobrimento da armadura que estava na faixa de 35 mm e também se observou que, quando o favo de mel existe próximo do aço de reforço é extremamente difícil analisar o tomograma para estimar a extensão do favo de mel devido às aparentes interferências das ondas tanto do favo de mel quanto do reforço de aço.

2.2.1.2.4 Detecção de falhas e profundidade de fissuras no concreto

O ensaio de ultrassom tem sido utilizado também quando há interesse na verificação do concreto, de eventuais falhas de concretagem internas (nichos), na determinação de fissuras e outros defeitos, tanto de concretagem quanto decorrentes de acidentes. Danos no nível estrutural alteram tanto as propriedades do material macroscopicamente mensurável quanto as propriedades acústicas. As microfissuras geradas levam a uma redução da velocidade ultrassônica (AGGELIS et al., 2010; AGGELIS et al., 2011; TATARINOV et al., 2019; BAEHAKI et al., 2019; FÜLÖP et al., 2022; THIELE; PIRSKAWETZ, 2022).

Em seus estudos, Pinto et al. (2010) utilizaram o método de propagação de ondas ultrassônicas para estimar a profundidade de abertura de fissuras superficiais. Os autores apresentaram dois métodos de medição do tempo de propagação da onda ultrassônica para duas situações referentes à localização da fissura na superfície da estrutura. A primeira situação é para quando a fissura está situada em uma região central da estrutura conforme Figura 43, onde os transdutores são colocados em locais equidistantes da fissura superficial ao longo de uma linha escolhida com pelo menos quatro posições.

Figura 43. Arranjo dos transdutores para medição do tempo com trinca centrada



Fonte: Adaptado de Pinto et al. (2010).

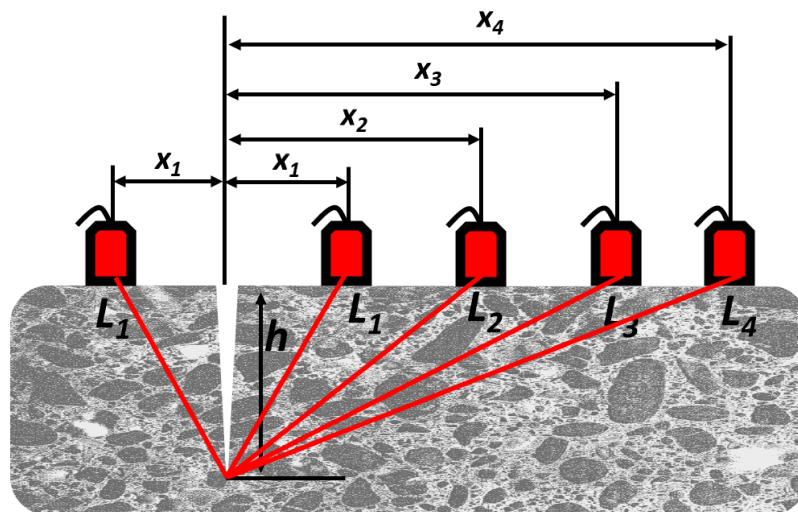
A profundidade da trinca é dada pela equação 7.

$$X_i^2 = V^2 \frac{T_i^2}{4} - h^2 \quad \text{Equação 7}$$

Onde: T_i^2 é o tempo de propagação da onda com os transdutores a uma distância X_i^2 da fissura; V^2 é a velocidade média da onda ultrassônica em m/s; e L_i é a metade do percurso (em m) assumida correspondente a T_i^2 (em s), que depende das distâncias X_i^2 e h (ambos em m).

A segunda situação é quando a trinca está situada em uma das regiões laterais (canto) da estrutura conforme Figura 44, onde o transdutor emissor é fixado em um lado da trinca enquanto o transdutor receptor é colocado em vários locais do lado oposto da trinca. A primeira posição deve ter ambos os transdutores equidistantes da abertura trinca, enquanto para outras o receptor é movido em incrementos fixos.

Figura 44. Arranjo dos transdutores para medição do tempo com trinca centrada



Fonte: Adaptado de Pinto et al. (2010).

A profundidade da trinca é dada pela equação 8.

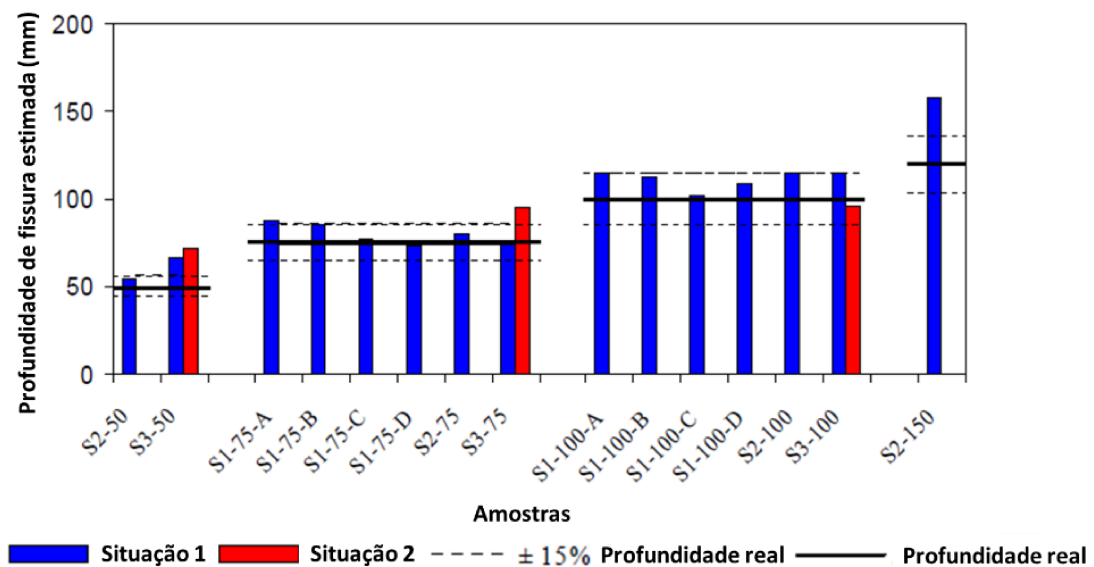
$$X_i^2 = V^2 \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right)^2 - h^2 \quad \text{Equação 8}$$

Os autores moldaram três séries de corpos de prova de concreto em laboratório com fissuras artificiais. As profundidades de fissuras foram 50, 75, 100 e 150 mm. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 45 e mostram que o método de ultrassom é uma ferramenta

muito útil em aplicações práticas com este propósito, pois os resultados em sua maioria ficaram dentro da margem de erro de 15% da profundidade real da fissura.

Baehaki et al. (2019) estudaram também a estimativa da profundidade de fissuras em prismas de concreto com profundidades de fissuras artificiais de ± 2 , ± 4 e ± 6 cm. Os autores concluíram que os corpos de prova com profundidade de fissura artificial de ± 2 e ± 4 cm têm um resultado de leitura maior com erro relativo de 36,8 e 16,5% respectivamente, enquanto para os prismas com profundidade de fissura artificial de ± 6 cm tem um resultado de leitura menor com erro relativo de 3,4%.

Figura 45. Estimativa da profundidade de fissuras



Fonte: Adaptado de Pinto et al. (2010).

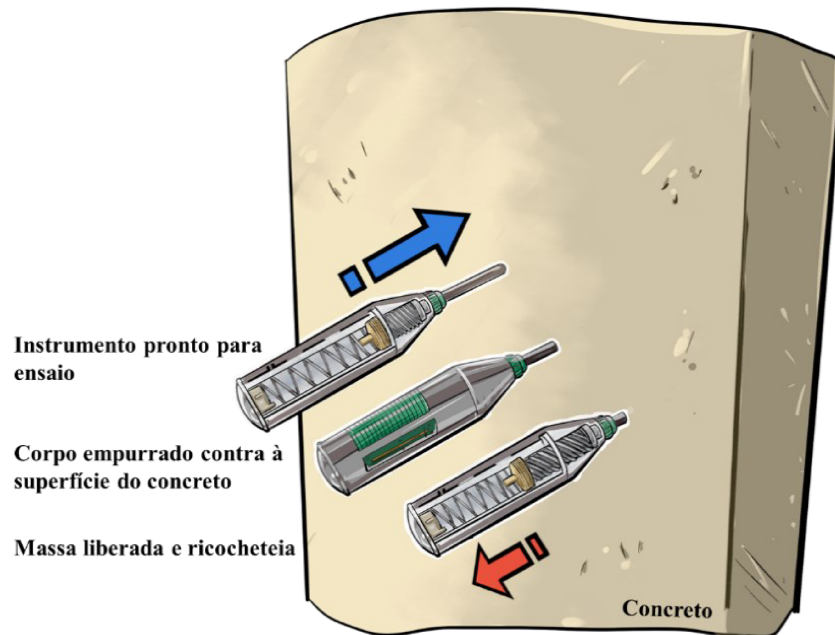
2.2.2 Métodos de dureza superficial

Este método de ensaio permite determinar a uniformidade superficial do concreto, delimitar zonas deterioradas ou de qualidade duvidosa, sendo por isso, indicado para estimar a resistência do concreto (NORHASRI et al., 2021; JAIN et al., 2022).

A avaliação da dureza superficial consiste no impacto com uma determinada energia sobre a superfície do concreto. A esclerometria é o método mais utilizado para medição de dureza superficial, possuindo uso simples e rápido para avaliação do concreto endurecido. No método, uma mola que carrega uma determinada massa é estendida até uma posição fixa, fazendo com que fique carregada de energia e em seguida, ela é liberada fazendo com que a

massa por ela carregada impacta a superfície do concreto e seja ricocheteada. A energia de impacto que causa o ricocheteamento é chamado de número de rebote ou índice esclerométrico (IE) que pode ser relacionado com a resistência à compressão do concreto (Figura 46) (MALHOTRA; CARINO, 2004; TAN et al., 2018; KUMAR et al., 2021).

Figura 46. Esquema de funcionamento do esclerômetro



Fonte: Santos (2022).

O esclerômetro pode ser usado na posição horizontal, vertical acima da cabeça ou verticalmente descendente, bem como em qualquer ângulo intermediário, desde que esteja perpendicular à superfície sob ensaio. A sua posição em relação à posição vertical afeta o índice esclerométrico (IE) devido à ação da gravidade sobre a massa do esclerômetro, sendo necessário efetuar correções nos valores dos IE medidos (KUMAR et al., 2021). Já existem no mercado esclerômetros com a mesma física de medição do IE, sem que este seja afetado pela gravidade e sem a necessidade de compensar a medição devido à direção de impacto (JAIN et al., 2022).

O ensaio é regido pelas normas ABNT NBR 7584, 2012 e ASTM C 805, 2018 que recomendam a necessidade de ter em atenção com os fatores que afetam as medições da dureza superficial durante a realização dos ensaios.

2.2.2.1 Fatores que afetam a medição da dureza superficial

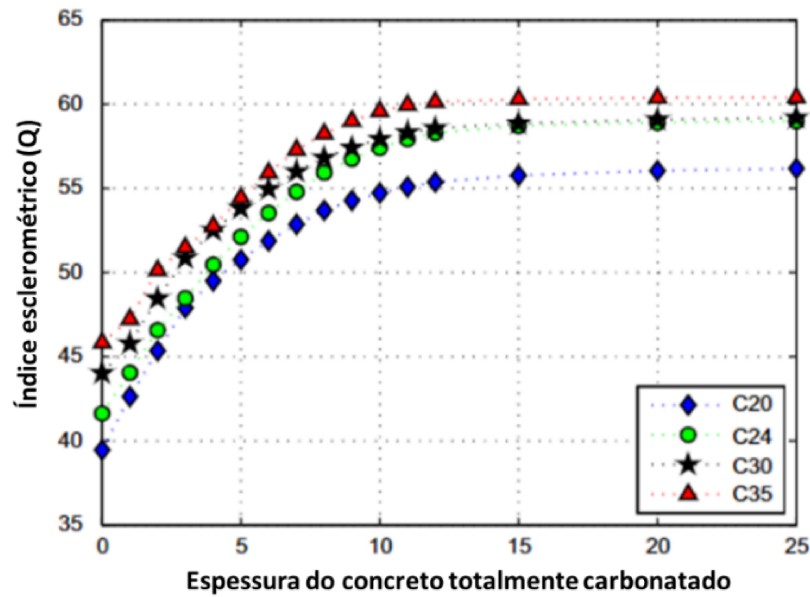
2.2.2.1.1 *Influência da carbonatação do concreto*

A resposta da dureza superficial está relacionada com as propriedades das camadas de concreto próximas à superfície. Dentro dessa região, a dureza superficial do concreto é maior do que a região interior do concreto devido ao efeito de carbonatação e ainda, a diferença de dureza aumenta à medida que a carbonatação progride (BRECCOLOTTI et al., 2013; METHA E MONTEIRO, 2014; MIR; NEHME, 2017). À temperatura ambiente, a carbonatação reduz a porosidade do concreto, pois o produto da carbonatação, carbonato de cálcio (CaCO_3), ocupa um volume maior que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Como resultado, a dureza superficial do concreto aumenta. Sendo que o aumento da dureza superficial se reflete no aumento do valor do índice esclerométrico (número de rebote), coeficientes de redução do índice esclerométrico devem ser usados para avaliar a resistência à compressão do concreto com carbonatação (KIM et al., 2009; BRECCOLOTTI; BONFIGLI, 2015; PANEDPOJAMAN; TONNAYOPAS, 2018; JEDIDI, 2020).

Breccolotti et al. (2013), em seus estudos, analisaram a influência da carbonatação nos valores medidos do índice esclerométrico em concretos com resistência à compressão de 20 MPa (C20), 24 MPa (C24), 30 MPa e 35 MPa. Os resultados mostraram que para concretos de mesma resistência, o valor do índice esclerométrico tende a aumentar à medida que a carbonatação progride, conforme se pode ver na Figura 47. Observa-se também que o índice esclerométrico não altera significativamente para espessuras de carbonatação superiores à 15 mm. Apenas os primeiros 15 mm do recobrimento do concreto são, portanto, envolvidos estimativa da dureza com esclerometria.

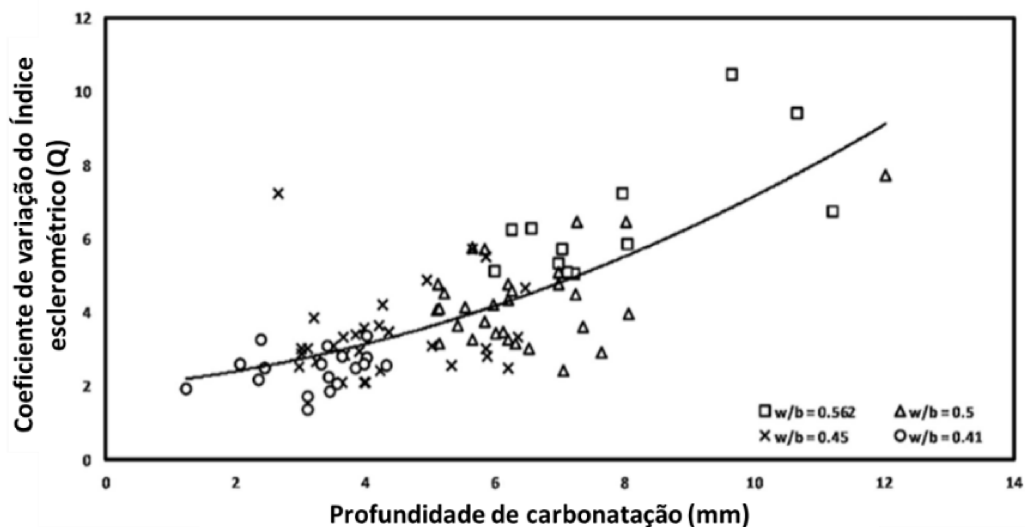
Mir e Nehme (2017) em seus estudos com concreto preparados com diferentes relações a/c (0,562 - 0,5 - 0,45 e 0,41) e profundidade de carbonatação variando entre 1,23 e 12,02 mm, os resultados mostraram que o índice esclerométrico (expresso em termos de coeficiente de variação V_r) é diretamente proporcional à profundidade de carbonatação, conforme Figura 48.

Figura 47. índice esclerométrico Q para diferentes profundidades de carbonatação



Fonte: Breccolotti et al. (2013).

Figura 48. Variação do índice esclerométrico em função da profundidade de carbonatação



Fonte: Mir e Nehme (2017)

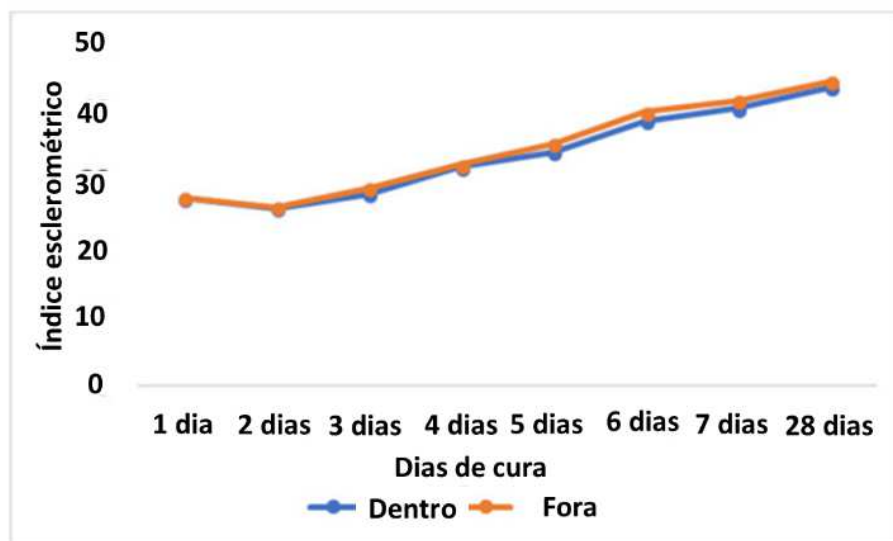
2.2.2.1.2 Influência da idade e tipo de cura do concreto

A cura é o processo de controle da taxa e extensão da perda de umidade do concreto durante a hidratação do concreto. A resistência à compressão do concreto aumenta com o aumento dos dias de cura, à medida que fica mais denso e com melhor qualidade da superfície. O valor do índice esclerométrico tende a aumentar com o aumento da idade do concreto devido

ao aumento da densidade em função da redução da porosidade derivada do processo de cura (KRISHNA et al., 2010; JAIN et al., 2013; MEMON et al., 2018; SLDOZIAN; HAMAD, 2019; OLONADE, 2020).

Memon et al. (2018) analisaram o efeito da cura de concretos expostos em laboratório (ambiente controlado) e fora de laboratório (ambiente não controlado). Os resultados (ver Figura 49) mostraram que o aumento nos dias de cura do concreto aumentou o valor do índice esclerométrico e que não houve diferença significativa nos valores do índice de esclerometria em 7 e 28 dias de cura, o que indicou que 7 dias de cura é tempo suficiente para concreto de resistência normal. Outro ponto observado foi que o concreto exposto em ambiente não controlado apresentou valores de índice esclerométrico ligeiramente maior do que aquele exposto em ambiente controlado.

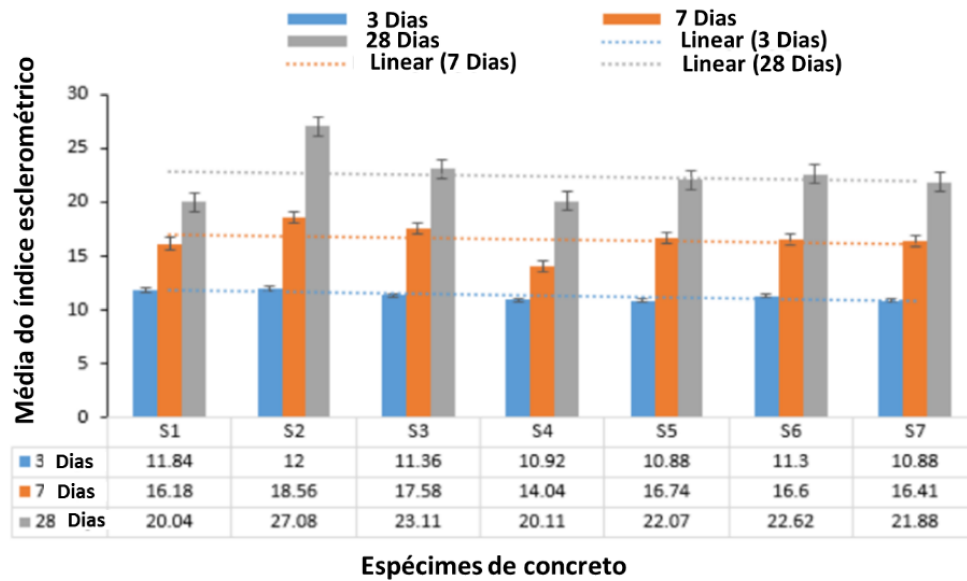
Figura 49. Índice esclerométrico e dias de cura



Fonte: MEMON et al., (2018).

Olonade (2020) ao investigar a influência da relação água/cimento no valor medido do índice esclerométrico em sete amostras de concreto (S1 à S7), notou que para cada amostra (traço), o aumento dos dias de cura do concreto tende a aumentar o valor do índice esclerométrico medido (Figura 50).

Figura 50. Média do Índice esclerométrico e dias de cura de cada espécimes



Fonte: Olonade (2020).

2.2.2.1.3 Influência da superfície no valor do índice esclerométrico

As características da camada adjacente à superfície do concreto testado têm influência no valor medido do índice esclerométrico. A espessura da camada, que influencia o valor, depende da quantidade de energia de impacto, da área de impacto e das propriedades elásticas e de resistência do concreto (KOVLER et al., 2018).

A textura da superfície tem um efeito importante na precisão dos resultados de teste. Quando o teste é realizado em uma superfície texturizada áspera, a ponta do êmbolo causa esmagamento excessivo e um número de rebote reduzido é medido. Pequenas bolsas de ar próximas à superfície sob o ponto de impacto causam baixo valor do índice esclerométrico, por outro lado, imediatamente sobre um agregado duro o impacto resulta em um valor alto. Superfícies feitas contra formas metálicas apresentam valores de índice esclerométricos de 5 a 25% maiores do que superfícies feitas contra formas de madeira (HANNACHI; GUETTECHE, 2014; KISHORE, 2014; BRENCICH et al., 2020).

2.2.2.1.4 Influência do tipo de agregado

A dureza e a elasticidade do agregado diferem da argamassa de cimento e influenciam os valores medidos do índice esclerométrico do concreto. Agregados próximos à superfície podem introduzir maior variabilidade dos valores medidos do índice de esclerometria

e para iguais resistência à compressão, os concretos feitos com agregados graúdos calcário britado apresentam índices esclerométricos aproximadamente 7 pontos menores do que os concretos feitos com agregados graúdo siliciosos (HANNACHI; GUETTECHE, 2014; KOVLER et al., 2018).

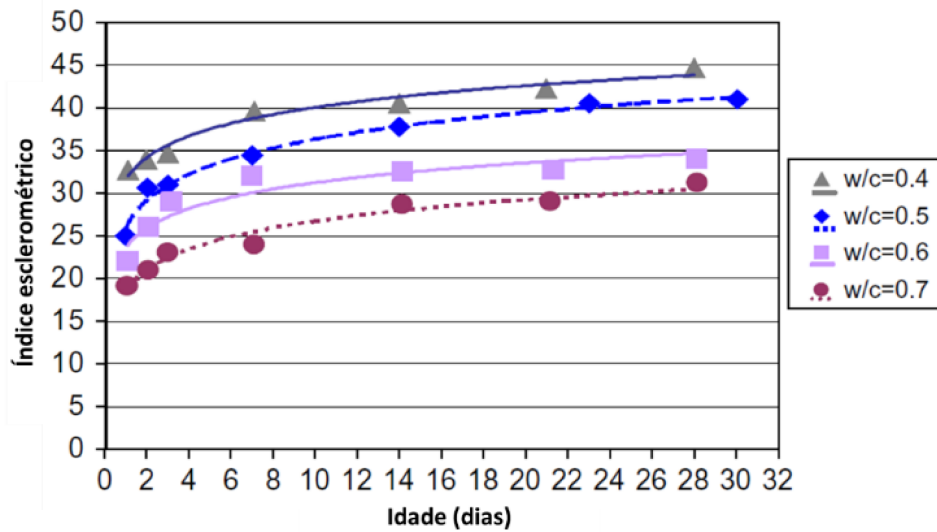
2.2.2.1.5 Influência da relação água cimento

Alterações no valor do índice de esclerométrico devido à alterações da relação água-cimento tendem a ser de natureza semelhante às relações encontradas entre resistência à compressão do concreto e relação água cimento, porém com menor intensidade (SAHA; AMANAT, 2021; KUMAVAT; CHANDAK, 2021).

Al-Mufti e Fried (2012) verificaram que o valor do índice esclerométrico aumenta com a idade, devido ao aumento de sua dureza superficial que é um reflexo do seu endurecimento geral à medida que continua amadurecer. Notou-se também que, o valor do índice aumenta com a redução da relação a/c, conforme Figura 51.

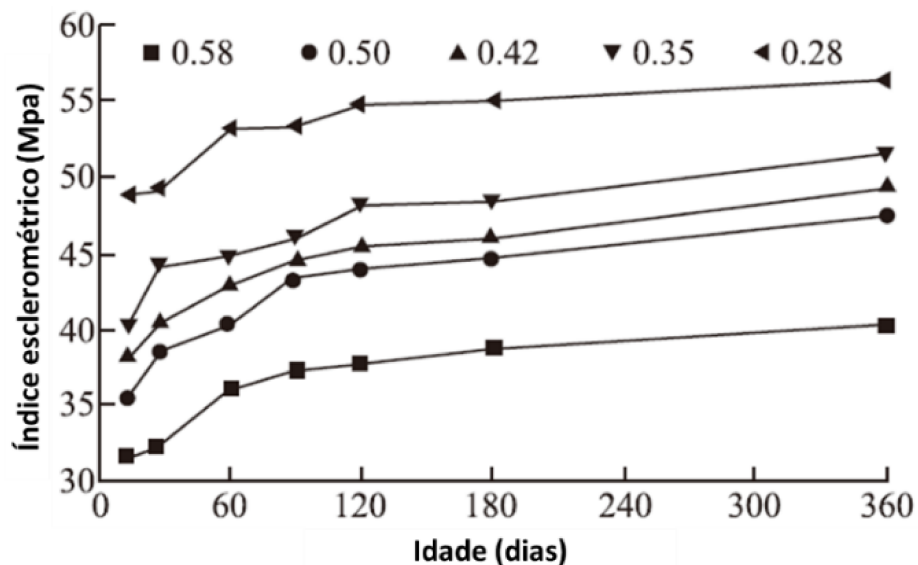
Resultados semelhantes foram encontrados por Yang et al. (2018). Os autores verificaram que com a diminuição da relação água-cimento do concreto de alto desempenho na mesma idade, o valor do índice esclerométrico aumentou, de acordo com a Figura 52. Os resultados demonstraram que com o aumento da quantidade de cimento devido à diminuição da relação água-cimento, mais produtos de hidratação da pasta de cimento preencheram os poros e a densidade do concreto aumentou, elevando a dureza da superfície do concreto.

Figura 51. Influência da relação água-cimento no índice esclerométrico



Fonte: Al-Mufti e Fried (2012).

Figura 52. Influência da relações água-cimento no índice esclerométrico



Fonte: Yang et al. (2018).

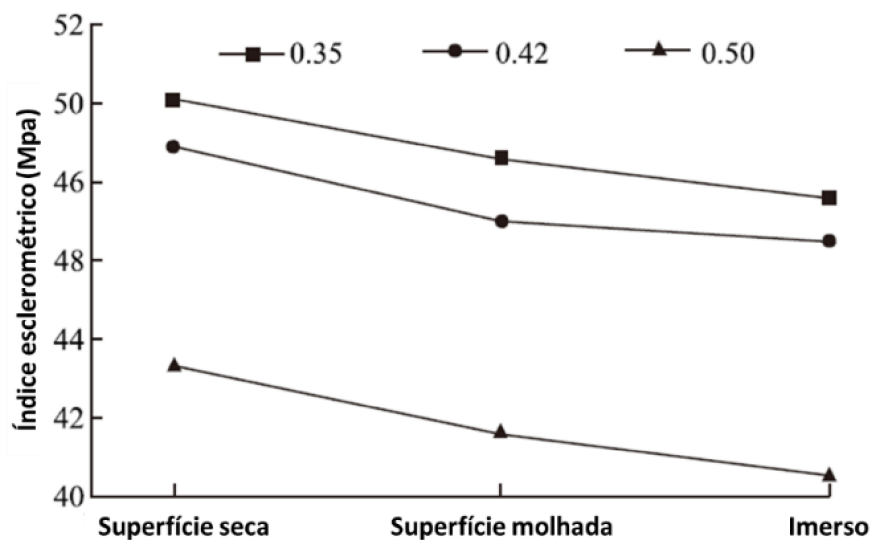
2.2.2.1.6 Influência da umidade

A umidade do concreto tem influência na medição do índice esclerométrico com destaque para concretos com alto valor da relação água-cimento, ou seja, concreto com alta capacidade de absorção de água. Os valores do índice esclerométrico são maiores em concreto seco do que aqueles medidos em concreto saturado com água (BROŽOVSKÝ, 2014; BRENCICH et al., 2020).

Segundo Yang et al. (2018), o valor do índice esclerométrico foi máximo quando a superfície do corpo de prova estava no estado seco. O valor do índice foi reduzido após a molhagem da superfície. Observaram também que quando o corpo de prova foi imerso em água, o valor do índice foi o mínimo (Figura 53).

Resultados semelhantes foram encontrados por Kumavat et al. (2021), pois, o aumento do teor de umidade do concreto da condição seca ao ar para a condição saturada de água resultou em menor índice esclerométrico de 20 a 25%.

Figura 53. Influência da umidade no índice esclerométrico



Fonte: Yang et al. (2018).

2.2.2.2 Aplicação do método de dureza superficial

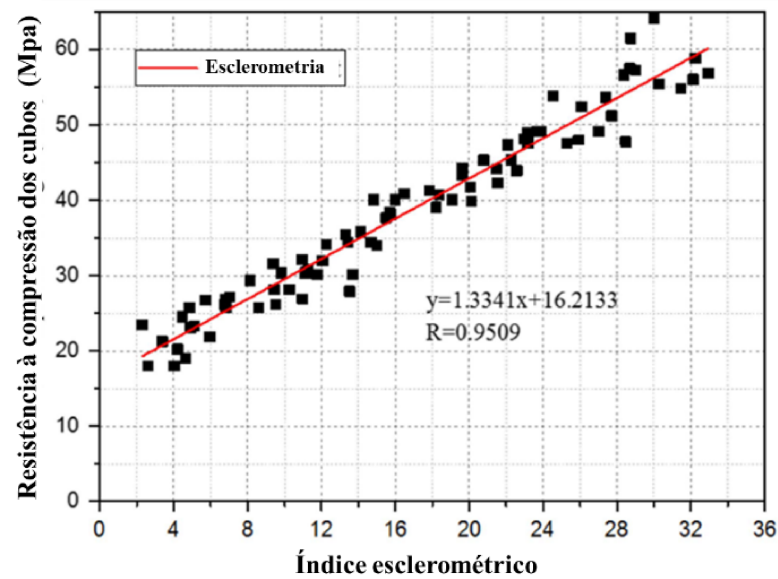
O método de dureza superficial ou esclerometria tem sido utilizado com o propósito de determinar a resistência à compressão ou avaliar a uniformidade de estruturas de concreto, novas e antigas, através da dureza superficial com uma margem de erro aceitável. Para sua utilização em campo, recomenda-se o desenvolvimento de curvas de correlação do índice esclerométrico a partir de ensaios em laboratório realizados em corpos de prova de concreto padrão confeccionados com os mesmos materiais utilizados na estrutura de concreto que está em avaliação ou extraídos dela (SANCHEZ; TARRANZA, 2015; JAIN et al., 2022; IVANCHEV, 2022)

Yang et al. (2021) estabeleceram uma correlação entre a resistência à compressão de cubos de concreto e o índice esclerométrico com objetivo de encontrar a equação para

determinação da resistência do concreto (Figura 54). A curva mostrou ser representativa apresentando um coeficiente de determinação de 0,95.

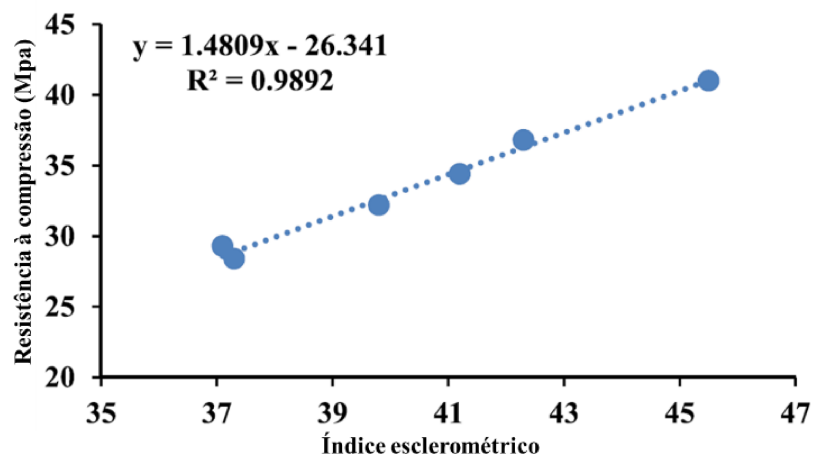
Do mesmo modo, nos estudos de Jain et al. (2022), foi estabelecido a correlação entre a resistência à compressão e o índice esclerométrico do concreto com 84 dias de idade. O resultado está apresentado na Figura 55 onde a curva de ordem linear melhor ajustada foi obtida com um coeficiente de determinação de 0,98.

Figura 54. Relação entre a resistência à compressão de cubos de concreto e esclerometria



Fonte: Yang et al. (2021).

Figura 55. Relação entre a resistência à compressão aos 84 dias e índice esclerométrico



Fonte: Jain et al. (2022).

2.2.3 Resistividade elétrica superficial

A resistividade elétrica do concreto é um parâmetro de primordial importância no processo de degradação das estruturas de concreto capaz de avaliar a possibilidade de desenvolvimento de corrosão (SILVA et al., 2022).

A resistividade elétrica (ρ) é o inverso da condutividade elétrica (σ) que indica a facilidade de um material em conduzir a corrente elétrica (Equação 9) e também é a expressão intrínseca da propriedade do material chamada resistência elétrica (R), que representa a capacidade de um material de impedir o fluxo de corrente elétrica conforme equação 10 (CALLISTER; WILLIAN, 2002; REDDY et al., 2020).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: σ é a condutividade elétrica do material em $(\Omega\text{m})^{-1}$; ρ é a resistividade elétrica do material em (Ωm) .

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad \text{Equação 10}$$

Onde: ρ é a resistividade elétrica do material em (Ωm) ; R é a resistência elétrica em (Ω) ; A é área de secção reta do material condutor (m^2); L é a distância entre os materiais condutores (m).

A lei de Ohm relaciona a corrente elétrica I com a diferença de potencial aplicada V (Equação 11).

$$V = IR \quad \text{Equação 11}$$

Onde: V (volts) é a diferença de potencial entre dois pontos do material; I (ampère) é a corrente elétrica e R (Ω) é a resistência elétrica.

Deste modo, a resistividade (ρ) pode ser obtida aplicando-se uma diferença de potencial (V) entre dois pontos quaisquer de um dado material e medindo-se a corrente I resultante, conforme equação 12.

$$\rho = \frac{VA}{IL} \quad \text{Equação 12}$$

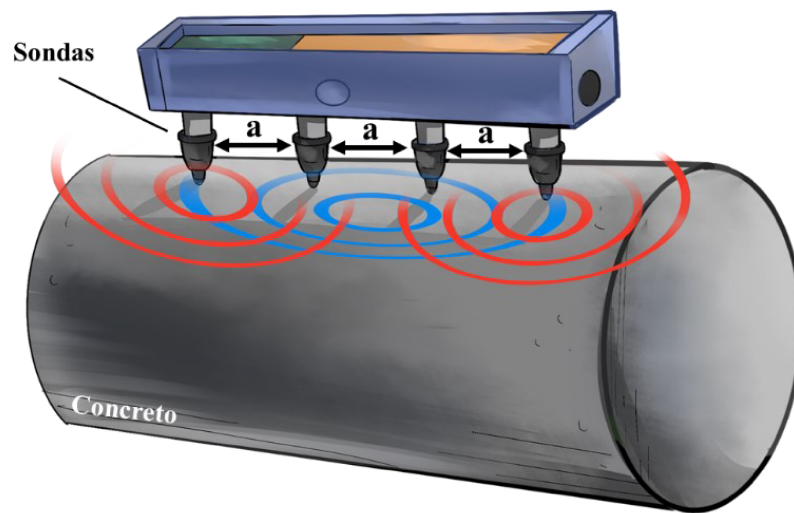
Conforme sua natureza, cada material apresenta seus valores de resistividade e de acordo com estes valores, os materiais são classificados como condutores, semicondutores e isolantes. O concreto úmido se comporta essencialmente como um eletrólito com resistividade

de até $100 \Omega\text{m}$, enquadrando-se no campo dos semicondutores, ao passo que quando seco (resistividade do ar na ordem de $10^6 \Omega\text{m}$), enquadra-se no campo dos materiais isolantes (NEVILLE, 2016; AZARSA et al., 2017).

Existem vários métodos para determinação da resistividade elétrica no concreto: método direto, método da resistividade elétrica volumétrica, método dos dois pontos, método do eletrodo externo e o método de Wenner ou método dos quatro pontos (AZARSA et al., 2017).

O método de Wenner ou dos quatro pontos, normalizado pela ASTM G 57 (2020), é o método mais empregado para obtenção da resistividade elétrica superficial do concreto. Neste método, os quatro eletrodos (sondas) igualmente espaçados são conectados eletricamente à superfície do concreto previamente umedecido. Os eletrodos externos são conectados a uma fonte de corrente alternada e os dois eletrodos internos são conectados a um voltímetro, conforme Figura 56. Em seguida, é aplicada uma corrente elétrica pelos eletrodos externos e é medida a diferença de potencial pelos eletrodos internos (MALHOTRA; CARINO, 2004; ABRAHAM e MATHEW, 2021).

Figura 56. Princípio de funcionamento pelo método Wenner



Fonte: Santos (2022).

A aplicação principal deste ensaio é para avaliar a taxa de corrosão e a Tabela 5 fornece um guia comumente usado para a interpretação das medições da probabilidade de corrosão significativa para concreto não saturado (REDDY et al., 2020).

Tabela 5. Guia para interpretação dos resultados de resistividade elétrica superficial

Resistividade (Ωcm)	Taxa de corrosão provável
Menor de 5.000	Muito alto
5.000 – 10.000	Alto
10.000 – 20.000	Baixo /Moderado
Maior que 20.000	Insignificante

Fonte: Reddy et al. (2020).

2.2.3.1 Fatores que afetam a medição da resistividade elétrica superficial

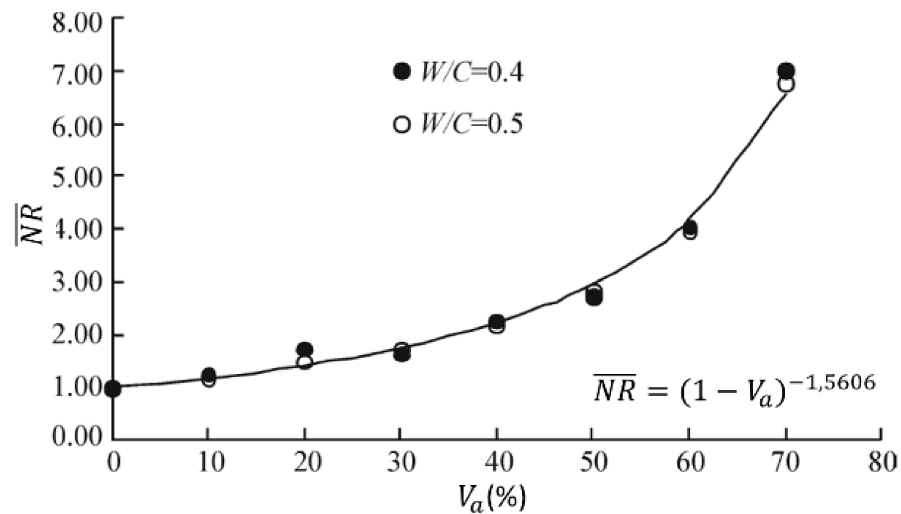
2.2.3.1.1 *Influência do agregado*

Em geral e dependendo de sua localização e tamanho, os agregados apresentam uma resistividade elétrica maior em relação a pasta cimentícia endurecida, pois apresentam menor porosidade; assim, a corrente elétrica pode fluir facilmente através do sistema de poros da pasta. A resistividade elétrica de agregados é muito maior do que a de pastas de cimento (SENGUL, 2014; HOU et al., 2017; AZARSA; GUPTA, 2017; KURDA et al., 2019; GRAZIA et al., 2021).

Os estudos de Wei e Xiao (2011) mostraram que a variação das frações volumétricas de agregado (V_a) de 0 - 70% em relações água-cimento (w/c) de 0,4 e 0,5 durante um dia, resultaram em aumento regular da resistividade do concreto em cada etapa da hidratação conforme Figura 57.

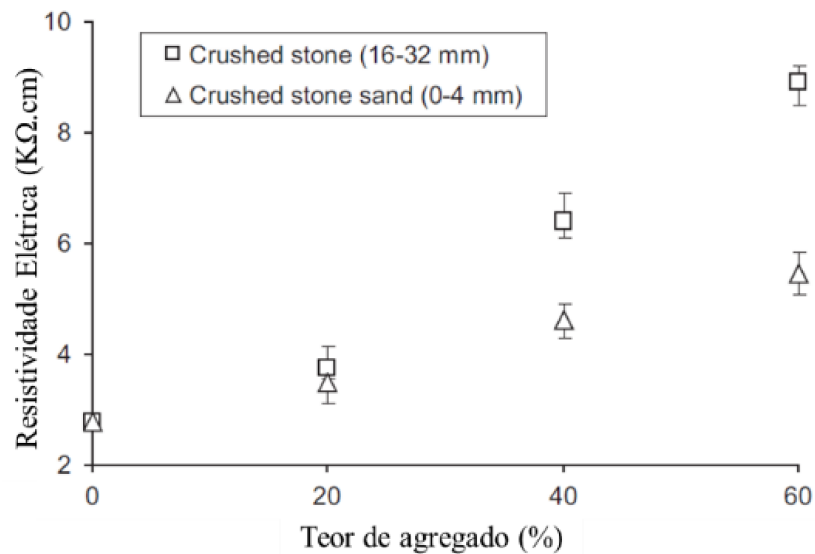
Resultados semelhantes foram encontrados por Sengul (2014) que estudou o efeito da granulometria do agregado na resistividade elétrica do concreto produzido com agregado tipo calcário triturado, com partículas de 0-4 mm e 16-32 mm. Os resultados, conforme Figura 58, mostraram que a resistividade mais alta foi obtida com o aumento do teor de agregado para ambos os tamanhos de agregados. As misturas contendo agregado graúdo de 16-32 mm apresentaram resistividade mais alta do que as misturas contendo agregado de 0-4 mm para uma determinada concentração de agregado, uma vez que a diferença aumentou à medida que o teor de agregado aumentou.

Figura 57. Resistividade normalizada (\overline{NR}) em função do conteúdo de agregado



Fonte: Wei e Xiao (2011).

Figura 58. Efeito do tamanho e teor de agregado na resistividade elétrica



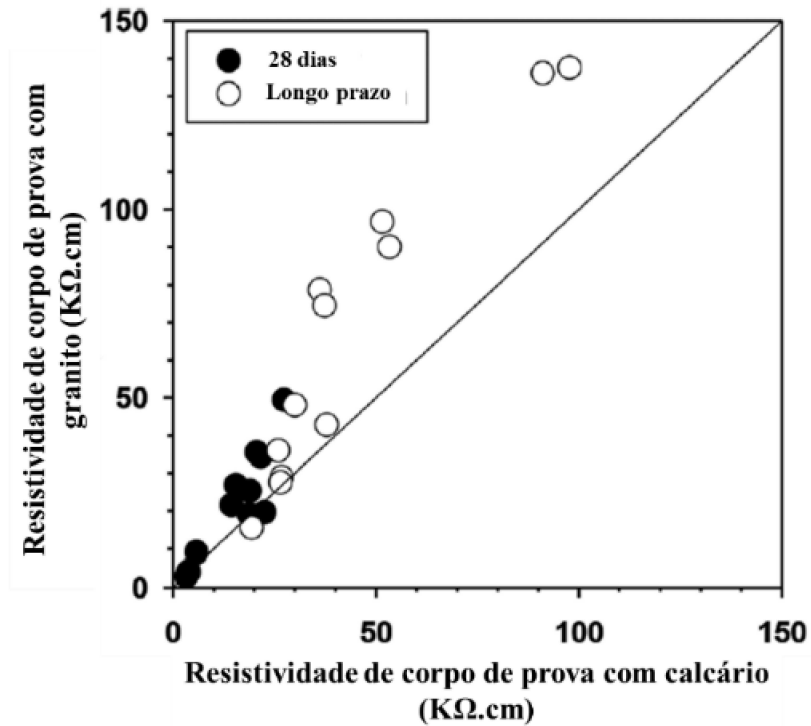
Fonte: Sengul (2014).

O estudo realizado por Liu e Moreno (2014) mostrou que o uso do granito como agregado graúdo e alternativa ao calcário pode aumentar a resistividade elétrica do concreto (Figura 59).

O estudo apresentado por Hnin et al. (2017) mostrou que concreto com baixo teor de pasta ($Y=1,3$) têm maior resistividade do que concreto com alto teor de pasta ($Y=1,4$), isto porque a resistividade elétrica do agregado é maior do que da pasta de cimento (Figura 60).

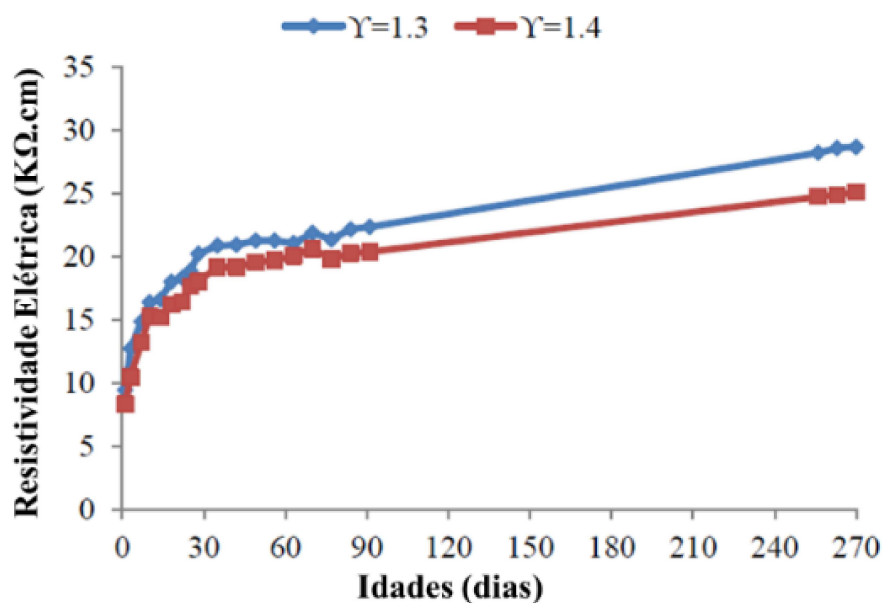
Segundo os autores, aos 91 dias, a resistividade elétrica do concreto com baixo teor de pasta foi 15% maior que a do concreto com alto teor de pasta.

Figura 59. Efeito do tipo de agregado na resistividade elétrica.



Fonte: Liu e Moreno (2014).

Figura 60. Efeito do teor de pasta de cimento e o teor de agregado na resistividade elétrica



Fonte: Hnin et al. (2017).

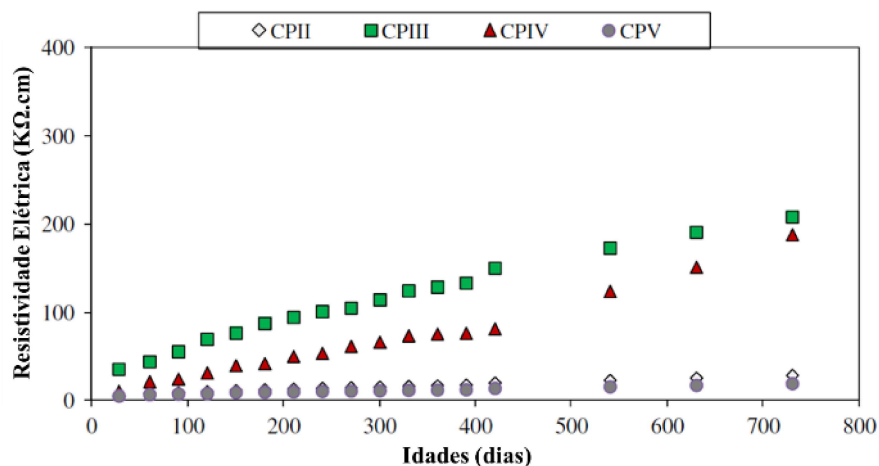
2.2.3.1.2 Influência do tipo de cimento e relação água-cimento

Os parâmetros que mais influenciam na porosidade e, portanto, na resistividade elétrica do concreto são a relação água-cimento e o teor de cimento. A medida que a relação água-cimento aumenta, a porosidade interna da microestrutura do concreto e sua conectividade também aumentam (METHA E MONTEIRO, 2014; CLEVEN et al., 2021). Deste modo, quanto maior a relação água-cimento, menor é a resistividade. Em geral, cimentos Portland comuns apresentam a menor resistividade elétrica, enquanto outros tipos de cimentos mais finos ou de resistências mais altas apresentam maior resistividade elétrica (HNIN et al., 2017; MEDEIROS-JUNIOR et al., 2019)

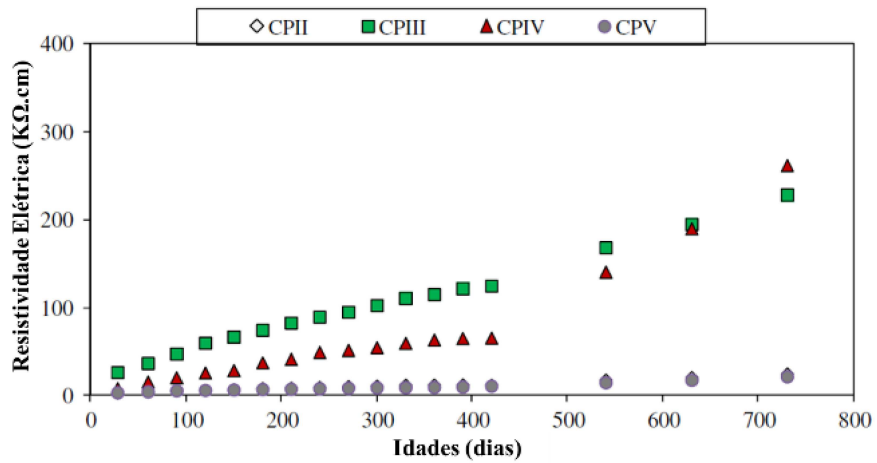
Os estudos realizados por Medeiros-Junior e Lima (2016) não mostraram relações de influência significativa entre as relações água-cimento (a/c) de 0,4, 0,5 e 0,6 nos valores de resistividade elétrica do concreto, para um mesmo tipo de cimento. Segundo os autores, os tipos de cimento tiveram um efeito significativo na resistividade. Os cimentos com adições de escória de alto-forno (CP-III) e pozolânicos (cinzas volantes, CP-IV) apresentaram maior resistividade (Figura 61). Este comportamento está relacionado com o efeito do refinamento dos poros do concreto e a redução da permeabilidade devido às adições.

O estudo apresentado por Hnin et al. (2017) mostrou que o concreto de cimento Portland comum (OPC) com menor proporção de água-cimento apresenta maior resistividade elétrica do que aqueles com maior proporção (Figura 62). Segundo os autores, isso ocorre porque a quantidade de poros interconectados diminui à medida que a relação água-cimento diminui.

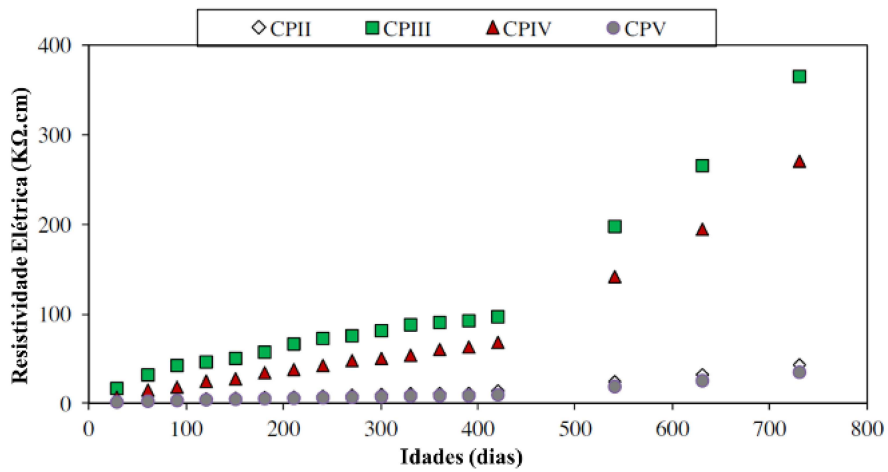
Figura 61. Efeito do tipo de cimento na resistividade elétrica para a/c : a) 0,4; b) 0,5 e c) 0,6



a) $a/c = 0,4$



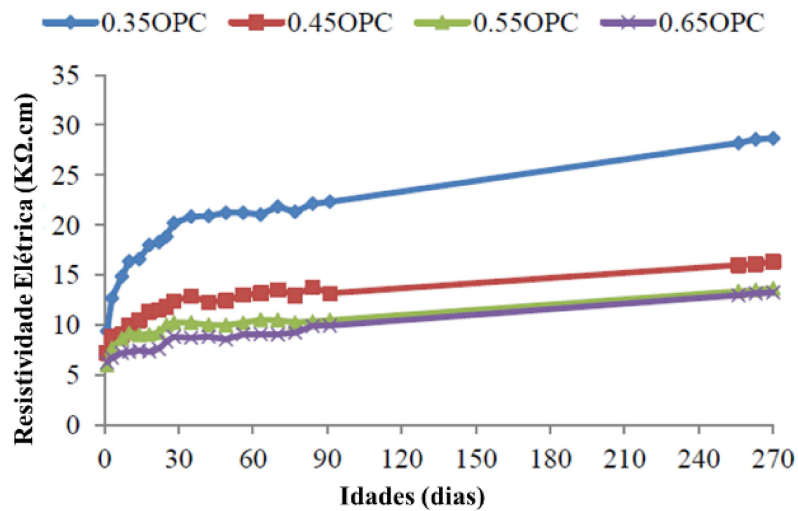
b) a/c = 0,5



c) a/c = 0,6

Fonte: Medeiros-Junior e Lima (2016)

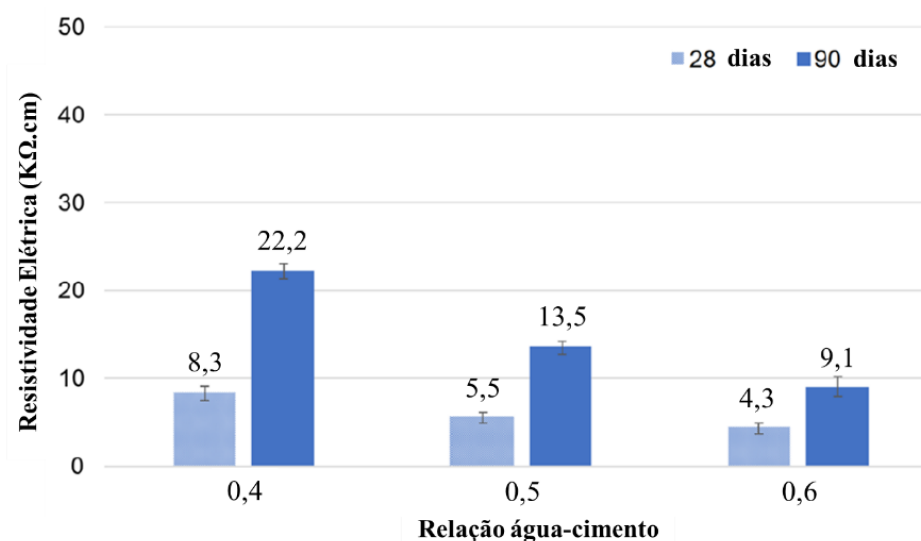
Figura 62. Efeito da relação água-cimento na resistividade elétrica do concreto.



Fonte: Hnin et al. (2017).

Semelhantemente, os estudos de Medeiros-Junior et al. (2018) mostraram que a resistividade elétrica do concreto aumenta com o tempo e que a taxa de aumento ao longo do tempo não é constante entre as diferentes relações água-cimento conforme Figura 63. Segundo os autores, a taxa de crescimento da resistividade é inversamente proporcional à relação água-cimento, ou seja, a resistividade elétrica do concreto é maior para a menor relação água-cimento na mesma idade.

Figura 63. Resistividade elétrica do concreto e relação água-cimento em diferentes idades



Fonte: Medeiros-Junior et al. (2018).

2.2.3.1.3 Influência da armadura

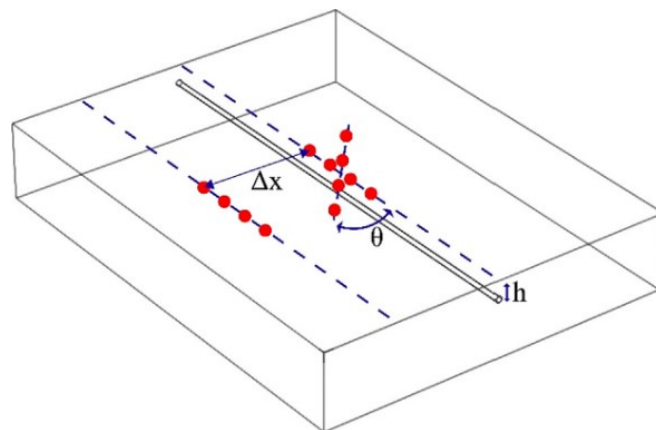
A resistividade elétrica superficial do concreto pode diminuir significativamente devido à alta condutividade elétrica da armadura embutida. Sendo um material altamente condutivo comparado ao concreto, as armaduras podem perturbar significativamente o fluxo de corrente elétrica e uma diminuição significativa na resistividade medida pode ser observada quando a medição é realizada paralelamente ou perpendicularmente à direção das armaduras (PRESUEL-MORENO et al., 2013; GARZON et al., 2014; ALHAJJ et al., 2019; LENCIONI et al., 2020; ROBLES et al., 2021; ROBLES et al., 2022).

Alhajj et al. (2019) estudaram o efeito da armadura nas medições de resistividade elétrica do concreto quando o equipamento de medição é posicionado paralela e perpendicularmente às armaduras (Figura 64a). Os resultados mostraram que quando a medição é executada paralelamente às armaduras com afastamento $\Delta x = 0, 40, 80$ e 120 mm e recobrimento fixado em 30 mm, para diferentes espaçamentos entre as sondas do equipamento

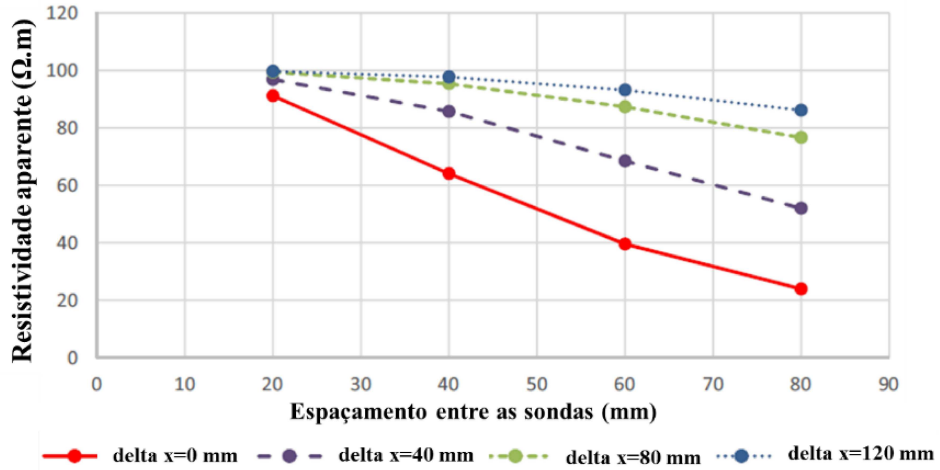
de medição - espaçamento igual a 40 mm para o dispositivo Wenner – há um comportamento decrescente o que confirma a presença da influência da armadura mesmo movendo o equipamento lateralmente em relação à armadura, conforme se observa na Figura 64b. Para um espaçamento entre as sondas de 40 mm, a armadura deixa de ter influência a partir de um afastamento $\Delta x = 80$ mm. Segundo os autores, se a medição for efetuada segundo a variação do ângulo θ de 0 a 90° (Figura 64c), percebe-se que quanto mais o ângulo aumenta, mais a linha do eletrodo se desvia do eixo da armadura e, portanto, é menos perceptível o efeito da armadura. Por fim, quando a medição é feita perpendicularmente ao eixo da armadura, não há influência significativa da armadura na medição (Figura 64c).

Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Lencioni et al. (2020) onde foram utilizados corpos de prova com uma única armadura de 2,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de recobrimento posicionada perpendicularmente ao eixo do corpo de prova (Figura 65a). Os resultados da resistividade elétrica aos 28 dias medidos sobre a armadura (0 cm) e paralelamente à armadura (de 2 a 32 cm de distância), mostraram que as medições deixaram de ser influenciadas pela condutividade da armadura a uma distância mínima de 8,0 cm. Todas as medições feitas em distâncias menores foram afetadas pela condutividade do aço (Figura 65b).

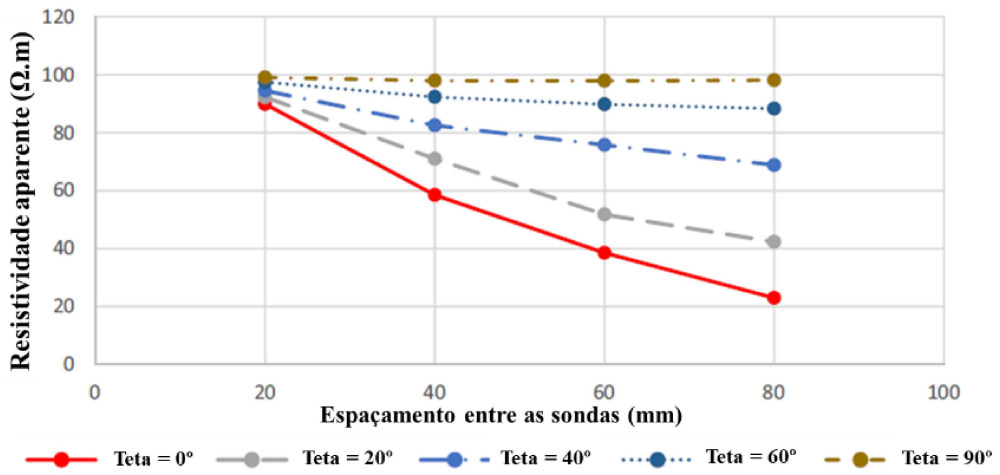
Figura 64. Resistividade elétrica do concreto: a) posicionamento da sonda em relação à armadura; b) Resultados da medição em paralelo; c) Resultados da medição em diferentes ângulos



a) Posicionamento da sonda em relação à armadura



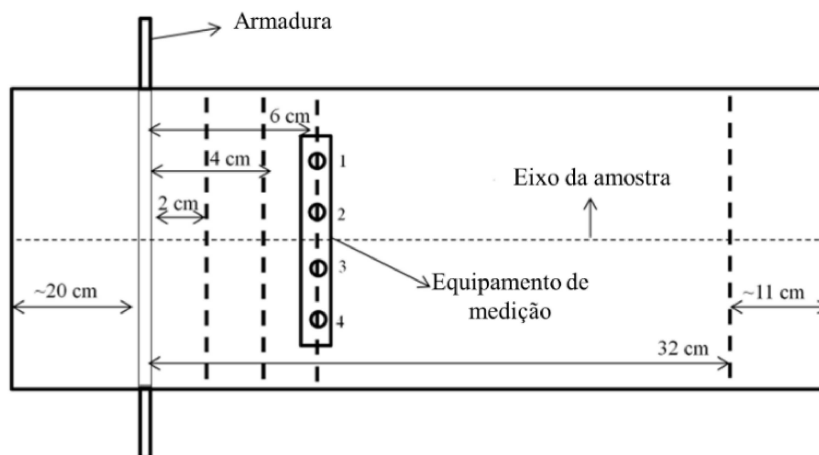
b) Resultado da medição em paralelo



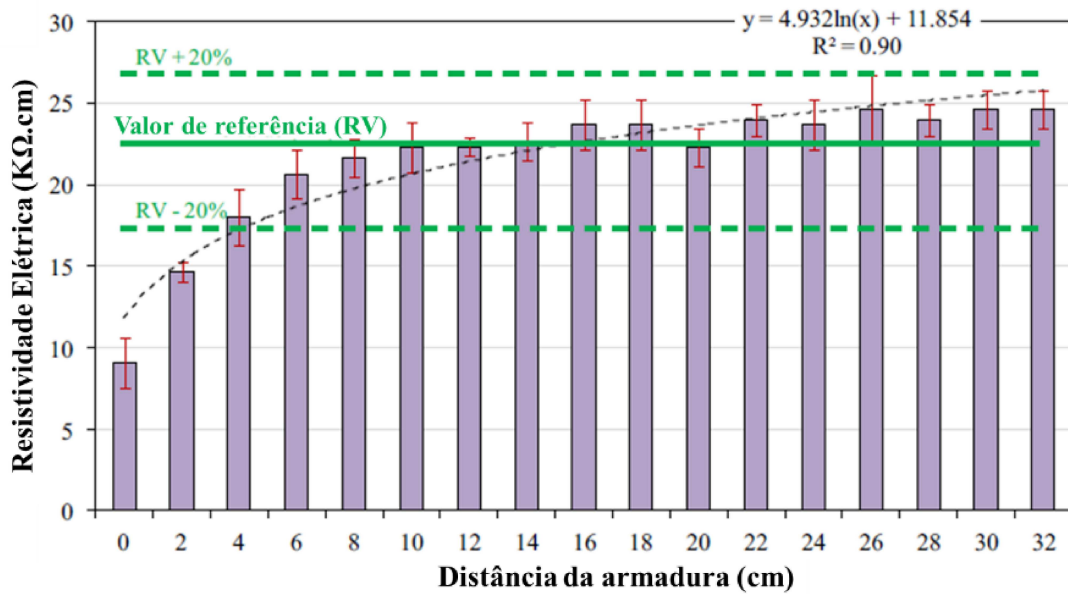
c)

Fonte: Alhadj et al. (2019).

Figura 65. Resistividade elétrica do concreto: a) posicionamento em paralelo do equipamento; b) resultado da medição



a)

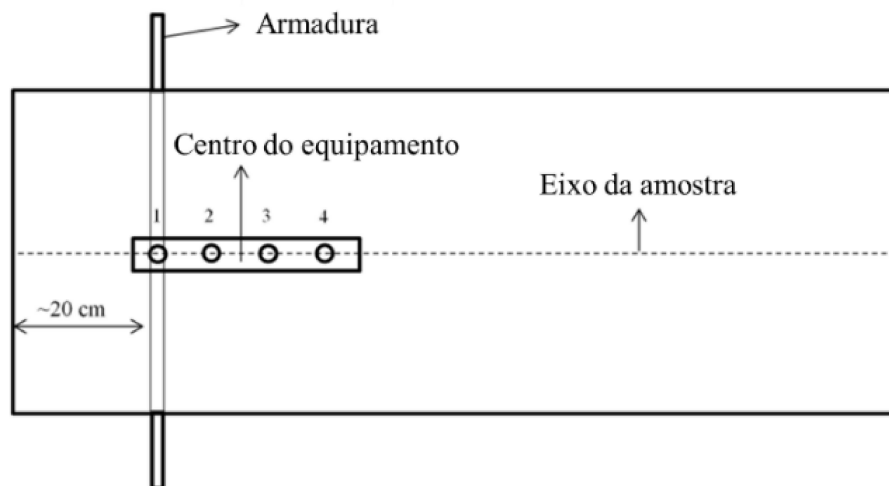


b)

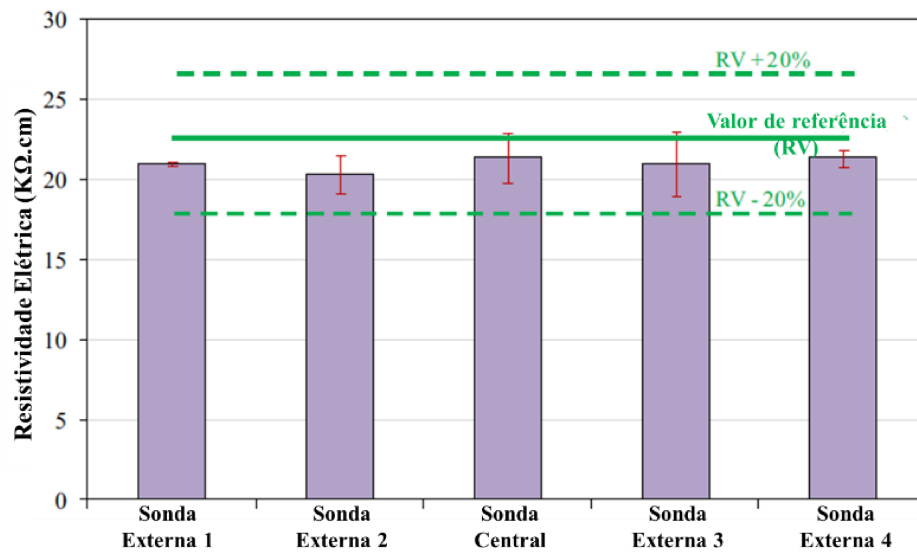
Fonte: Lencioni et al. (2020).

Segundo os autores, as medições de resistividade elétrica perpendicular às armaduras (Figura 66a), não foram afetadas pela condutividade da armadura (Figura 66b).

Figura 66. Resistividade elétrica do concreto: a) posicionamento perpendicular do equipamento; b) resultado da medição



a)



b)

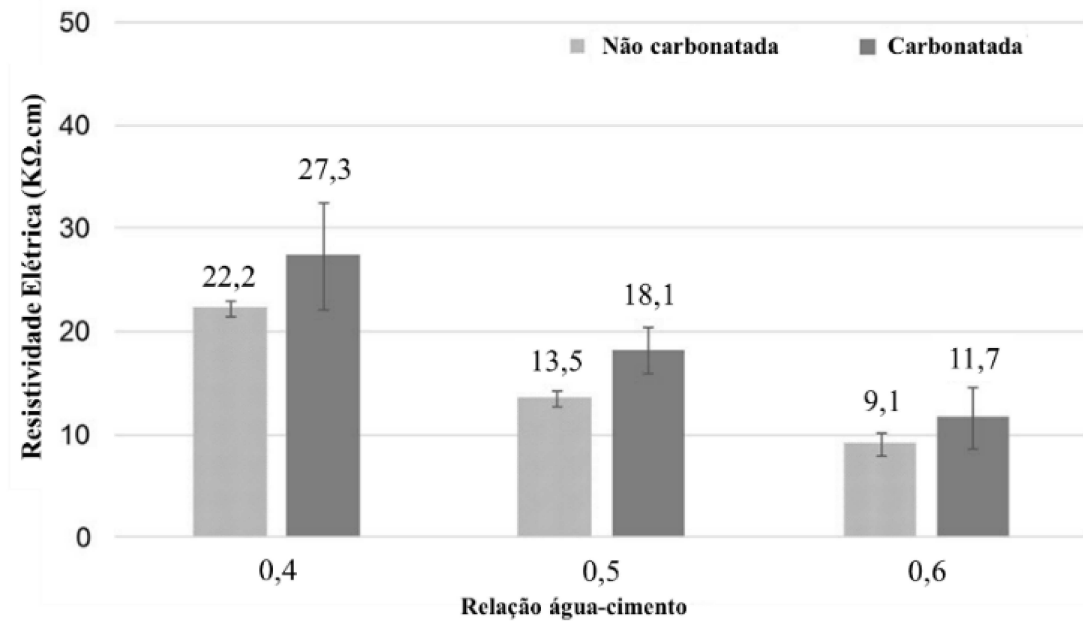
Fonte: Lencioni et al. (2020).

2.2.3.1.4 Influência da carbonatação

A carbonatação do concreto é uma reação onde a combinação de CO_2 com a portlandita – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – produz carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse composto é responsável pelo refinamento dos poros, limitando o fluxo de corrente elétrica no interior do concreto. A carbonatação promove a diminuição da porosidade, aumento da densidade superficial e resistividade elétrica do concreto em função do tempo (MEDEIROS-JUNIOR et al., 2018; PAUL et al., 2018; GAWEL et al., 2021).

Os estudos de Medeiros-Junior et al. (2018) mostraram que a resistividade elétrica foi maior para os corpos de prova carbonatados quando comparados com a mesma relação água-cimento, conforme Figura 67. O aumento foi de 22,9, 34,2 e 29,3% para as relações água-cimento de 0,4, 0,5, e 0,6, respectivamente. O carbonato reage com a portlandita (hidróxido de cálcio) e então ocupa mais espaço devido ao volume do carbonato de cálcio formado. O carbonato de cálcio formado devido a carbonatação contribuiu para refinar os poros do concreto. Como consequência, a matriz do concreto é densificada e a resistividade aumenta.

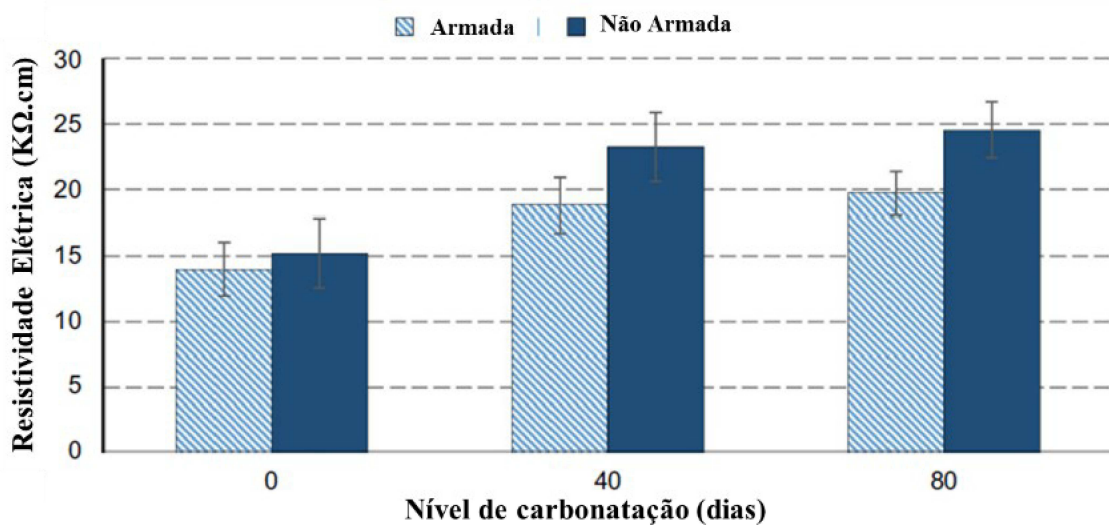
Figura 67. Resistividade elétrica de amostras saturadas carbonatadas e não carbonatadas.



Fonte: Medeiros-Junior et al. (2018).

Resultados semelhantes foram encontrados por Mendes et al. (2019) que mostraram que quanto mais tempo as amostras permanecem na câmara de carbonatação, maior é a resistividade elétrica do concreto (ver Figura 68). Na mesma Figura, assume-se que quanto mais tempo a amostra permanece na câmara de carbonatação, maior é o nível de carbonatação.

Figura 68. Resistividade elétrica de amostras com e sem armadura à diferentes níveis de carbonatação



Fonte: Mendes et al. (2019).

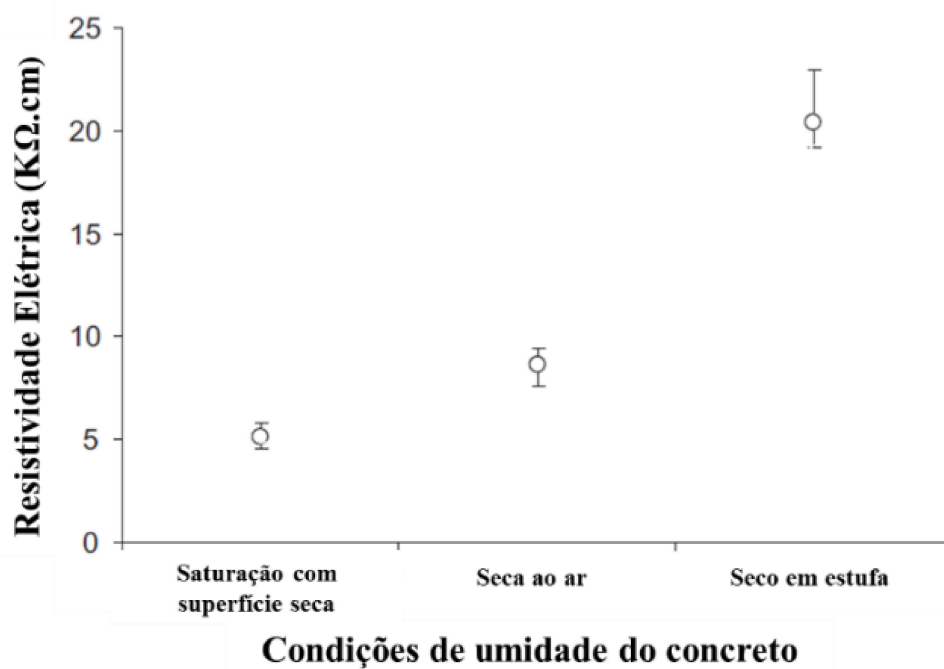
2.2.3.1.5 Influência da umidade

A umidade pode afetar inversamente a medida da resistividade elétrica do concreto. Essencialmente, a condutividade elétrica aumenta com o aumento do teor de umidade devido à mudança na mobilidade dos íons. Como a corrente elétrica é transportada pelos íons que fluem através da solução dos poros no concreto, maior teor de umidade leva a um fluxo elétrico mais fácil e, portanto, a resistividade elétrica é reduzida (SU et al., 2002; AZARSA; GUPTA, 2017; DEMIRCILIOGLU et al., 2019).

O estudo de Sengul (2014) mostrou que a condição de umidade da amostra ensaiada afetou a resistividade elétrica medida. Para amostras seca ao ar o concreto apresentou resistividade aproximadamente 50% maior do que no estado saturado. Portanto, o teor de umidade reduzido aumenta significativamente a resistividade elétrica, conforme mostrado na Figura 69.

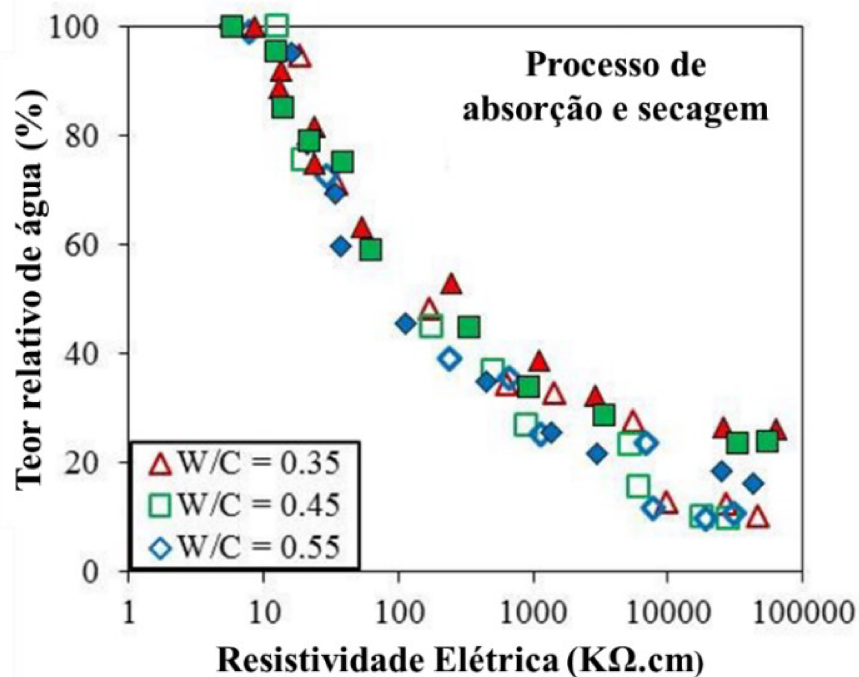
Resultados semelhantes foram apresentados por Bui et al. (2016) em que a resistividade de corpos de prova de argamassa diminuíram com o aumento do teor relativo de água tanto no processo de absorção de umidade quanto no de secagem, conforme Figura 70.

Figura 69. Efeito das condições de umidade na resistividade elétrica



Fonte: Sengul (2014).

Figura 70. Relação entre resistividade e teor relativo de água de amostras através de processos de absorção de umidade e secagem



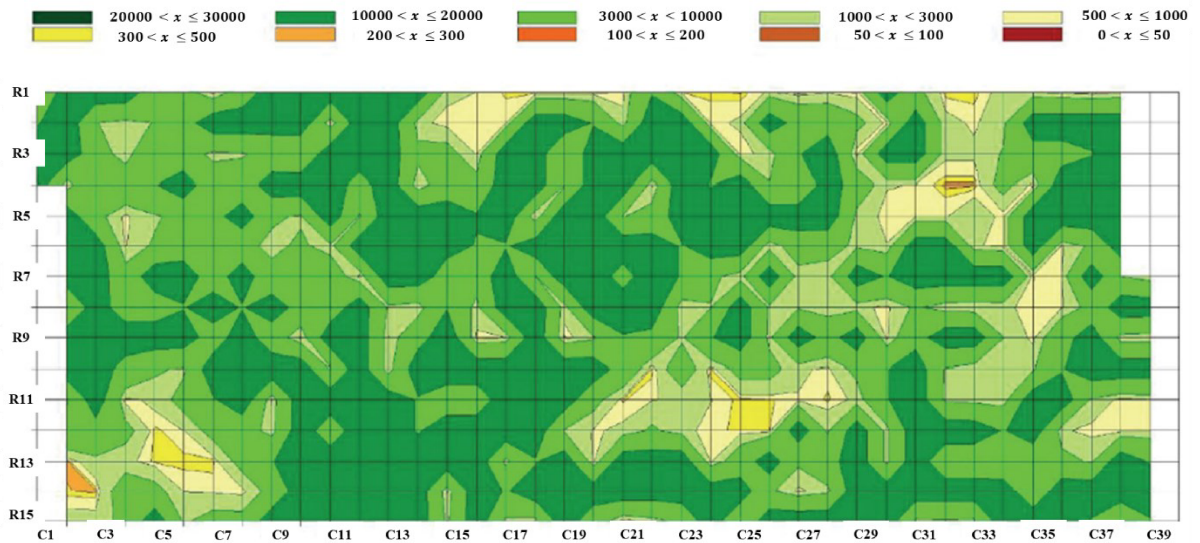
Fonte: Bui et al. (2016).

2.2.3.2 Aplicação do método de resistividade elétrica superficial

A medição da resistividade do concreto, que está inversamente relacionada à taxa de corrosão, fornece informações adicionais para avaliar a probabilidade de diferentes níveis de atividade de corrosão, tornando-se num complemento útil para um ensaio de potencial de meia célula. Uma alta resistividade indica que, mesmo que o aço esteja corroendo ativamente conforme determinado pelo método de potencial de meia célula, a taxa de corrosão pode ser baixa. A técnica tem sido muito aplicada na avaliação de estruturas para manutenção e reparos, com os resultados apresentados na forma de mapas para melhor interpretação com os valores de potencial de meia célula (BUNGEY et al., 2006; REICHLING et al., 2012; DINH et al., 2019; BOURREAU et al., 2019).

Reichling et al. (2012) identificaram áreas críticas em relação ao desenvolvimento de corrosão do aço do pavimento de um estacionamento com a utilização de resistividade elétrica e o resultado foram apresentados em forma de mapa (gráfico de contorno) com tamanho de grade de 0,375 x 0,375 m conforme Figura 71. Nesta Figura, a letra x se refere ao valor medido de resistividade para cada zona, R e C são os linhas verticais e horizontais da grade espaçados a 0,375 m.

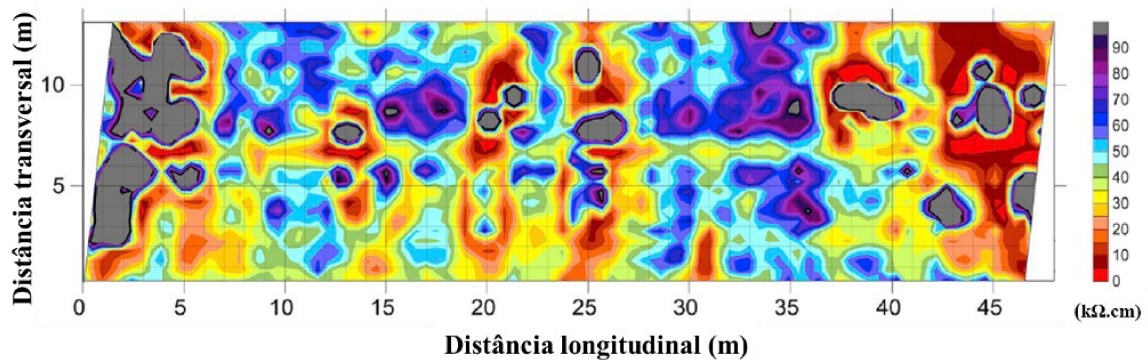
Figura 71: Gráfico de contorno mostrando a distribuição da resistividade elétrica.



Fonte: Reichling et al. (2012).

Dinh et al. (2019), com objetivo de avaliar as condições de deterioração da estrutura do tabuleiro de uma ponte, quanto a corrosão das armaduras, usaram o método de resistividade elétrica e o resultado foi apresentado em forma de mapa conforme a Figura 72.

Figura 72: Mapa das condições do tabuleiro da ponte pelo método da resistividade elétrica



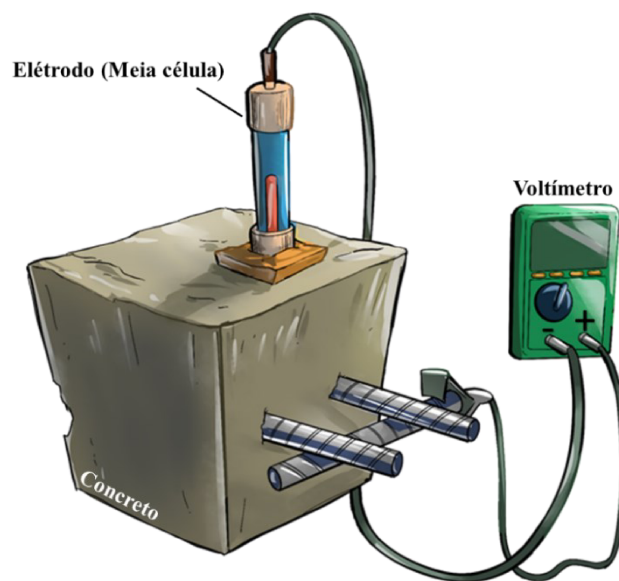
Fonte: Dinh et al. (2019).

2.2.4 Potencial de corrosão

Esse ensaio tem sido amplamente utilizado com sucesso nos últimos anos, onde há a suspeita de corrosão da armadura do aço e normalmente envolve a medição do potencial do aço embutido em relação a um eletrodo (meia célula) de referência colocado na superfície do concreto (SILVA et al., 2022). Este ensaio é normalizado pela ASTM C 876 (2015).

As medições são feitas em uma grade ou padrão aleatório. Uma área com mais de 150 mV indica uma área de alta atividade de corrosão. Uma conexão elétrica direta é feita na armadura embutida com um grampo de compressão. Importante salientar que pode ser necessário perfurar o concreto para expor uma barra da armadura embutida para conectá-la ao grampo e a outra extremidade é conectada ao terminal positivo do voltímetro. Uma extremidade do fio condutor é conectada ao eletrodo de referência (meia célula) e a outra extremidade ao terminal negativo do voltímetro (Figura 73). Em alguns casos, a superfície do concreto deve ser pré-umedecida com um agente umectante. Se a leitura do eletrodo de referência flutuar com o tempo quando é colocado em contato com o concreto, a superfície do concreto ou os pontos onde o eletrodo de referência será colocado deverá ser pré-umedecido com um agente umectante (SIDDHARTHA et al., 2019).

Figura 73. Esquema de medição do potencial de corrosão



Fonte: Santos (2022).

O eletrodo de referência é geralmente uma célula de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) ou prata/cloreto de prata (Ag/AgCl), embora outras combinações têm sido usadas. Diferentes tipos de células produzirão diferentes valores de potencial de superfície e correções de resultados para uma célula padronizada apropriada pode ser necessário durante a interpretação (BUNGEY et al., 2006; REDDY et al., 2020). Uma leitura de tensão mais negativa na superfície é interpretado como elétrons em excesso na barra da armadura embutida

e, nesse caso, há uma probabilidade maior de que a barra esteja corroída (ver Tabela 6) (SIDDHARTHA et al., 2019).

Tabela 6. Guias para interpretação dos resultados do ensaio de potencial de corrosão

Potencial de corrosão E (mV) em relação a diferentes eletrodos de referência		Probabilidade de atividade de corrosão
Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl	Interpretação
E < -200	E < -120	Probabilidade superior a 90% de que nenhuma corrosão está ocorrendo
-200 < E < -350	-120 < E < -270	A atividade de corrosão é incerta
E > -350	E > -270	Probabilidade superior a 90% de que a corrosão está ocorrendo

Fonte: SIDDHARTHA et al. (2019).

As leituras de potencial de corrosão são indicativas da probabilidade de atividade de corrosão do aço embutido localizado abaixo da célula de referência. O método fornece um meio rápido e de baixo custo para identificação de zonas que necessitam análise ou reparos. No entanto, os resultados do ensaio podem ser afetados por diversos fatores que merecem devida atenção durante a realização do ensaio.

2.2.4.1 Fatores que afetam a medição do potencial de corrosão

2.2.4.1.1 *Influência da umidade*

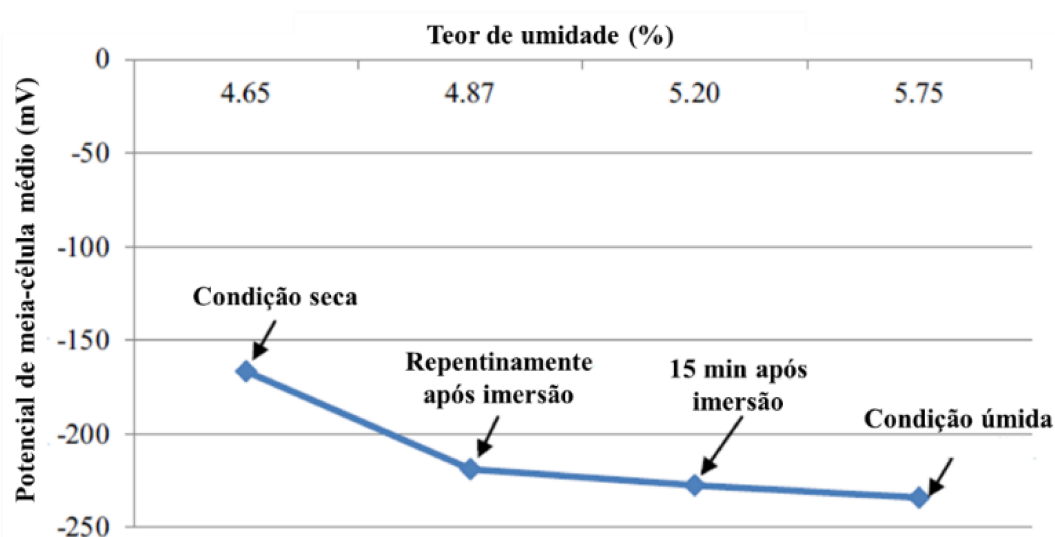
A umidade é o eletrólito do processo eletroquímico. Deste modo, a corrosão só acontece se houver um nível mínimo de umidade. Sendo assim, a medição do potencial de corrosão é muito sensível à umidade existente no concreto, ou seja, o fato de estar molhada ou seca a superfície na qual as medições de potencial de corrosão estão sendo feitas pode ter um impacto significativo nas leituras de potencial. As áreas que estão sujeitas a um aumento do teor de umidade tendem a apresentar um deslocamento negativo nos valores de potenciais medidos, ou seja, o potencial de corrosão se apresenta mais negativo. Isto pode levar à conclusões equivocadas em relação ao risco de corrosão (KEBLER; GEHLENYODSUDJAI, 2016; MEDEIROS et al., 2017; JEONG et al., 2021).

Os estudos de Yodsudjai e Pattarakittam (2017) mostraram que o valor medido do potencial de corrosão diminui (apresenta valores mais negativos) com o aumento do teor de

umidade. A diferença de umidade variou com o período após a imersão em água (condição seca, repentinamente após imersão, 15 minutos após imersão e 1 semana após imersão), conforme Figura 74.

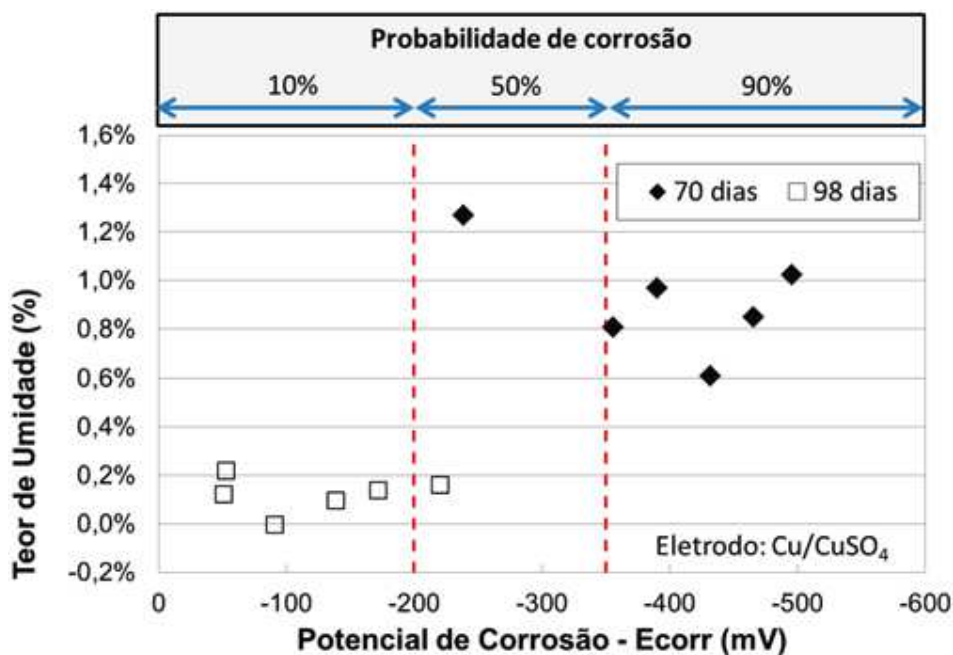
Resultados semelhantes foram encontrados por Medeiros et al. (2017) que analisaram o efeito do teor de umidade no potencial de corrosão em dois momentos: aos 70 dias (fase 1) e aos 98 dias (fase 2). Os resultados, conforme Figura 75, mostraram que os potenciais de corrosão aos 70 dias medidos nos corpos de prova que se encontravam em ambiente úmido (saturado) são mais negativos que os potenciais de corrosão aos 98 dias quando os corpos de prova encontravam-se com menor teor de umidade, ou seja, secos em ambiente de laboratório entre 71 e 98 dias.

Figura 74. Relação entre o valor do potencial e teor de umidade



Fonte: Yodsudjai e Pattarakittam (2017).

Figura 75. Correlação entre o potencial de corrosão e o teor de umidade



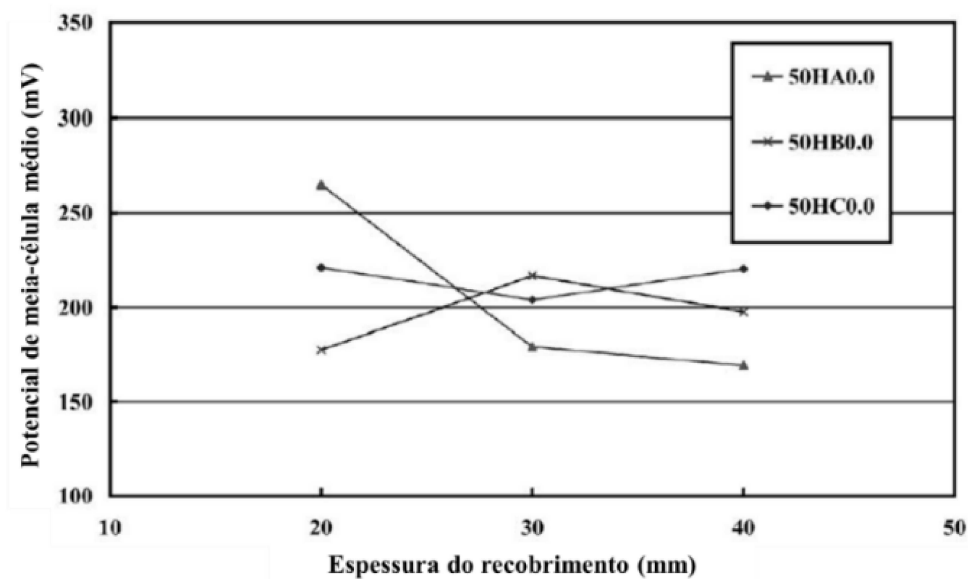
Fonte: Medeiros et al. (2017).

2.2.4.1.2 Influência da camada de revestimento das armaduras

O revestimento das armaduras do concreto oferece proteção às armaduras contra os agentes agressivos do exterior na forma de fluídos ou gases. Portanto, revestimentos mais espessos promovem melhor resistência contra o íon cloreto e carbonatação. À medida que a espessura do revestimento aumenta, a taxa de corrosão diminui, ou seja, os valores de potencial medidos sobre áreas ativas e passivas tornam-se semelhantes para concretos contaminados por cloretos. Para concretos não contaminados ou concretos normais, a espessura do revestimento da armadura não influencia a medição do potencial de corrosão (JUNG et al., 2003; COCA et al., 2004; MEDEIROS et al., 2017; LOPEZ-CALVO et al., 2018; CASSIANI et al., 2021).

Nos estudos de Jung et al. (2003) para concretos sem contaminação por cloreto, os resultados mostraram não haver influência significativa da espessura do revestimento na medição do potencial de corrosão (conforme Figura 76), para mesma relação água-cimento de 0,5.

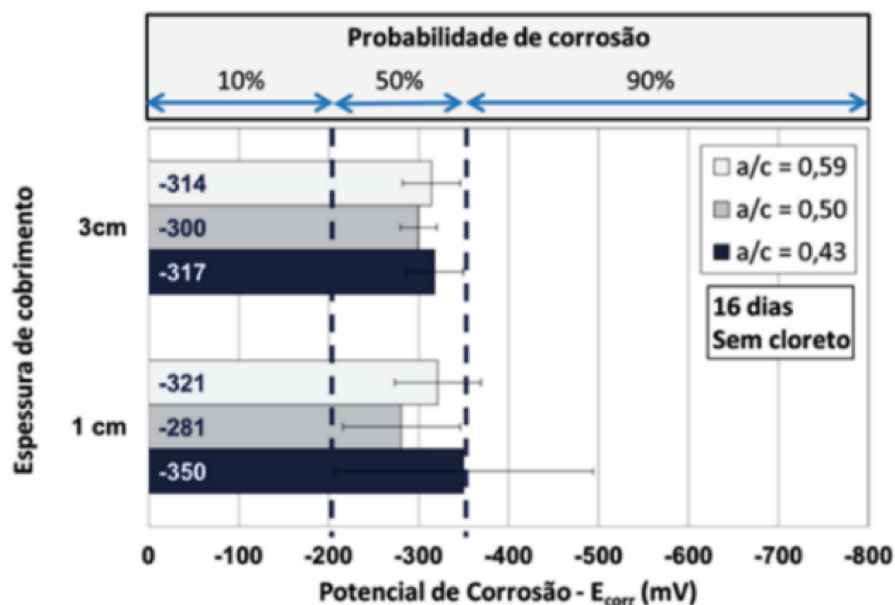
Figura 76. Potencial de corrosão de acordo com o recobrimento para $w/c = 0,5$



Fonte: Jung et al. (2003).

Resultados semelhantes foram encontrados por Medeiros et al. (2017). O efeito da espessura do recobrimento na medição do potencial de corrosão não foi relevante quando o concreto não está contaminado por cloretos (Figura 77).

Figura 77. Influência da espessura do recobrimento sobre o potencial de corrosão com $a/c=0,43$; $0,50$ e $0,59$ – sem cloreto



Fonte: Medeiros et al. (2017).

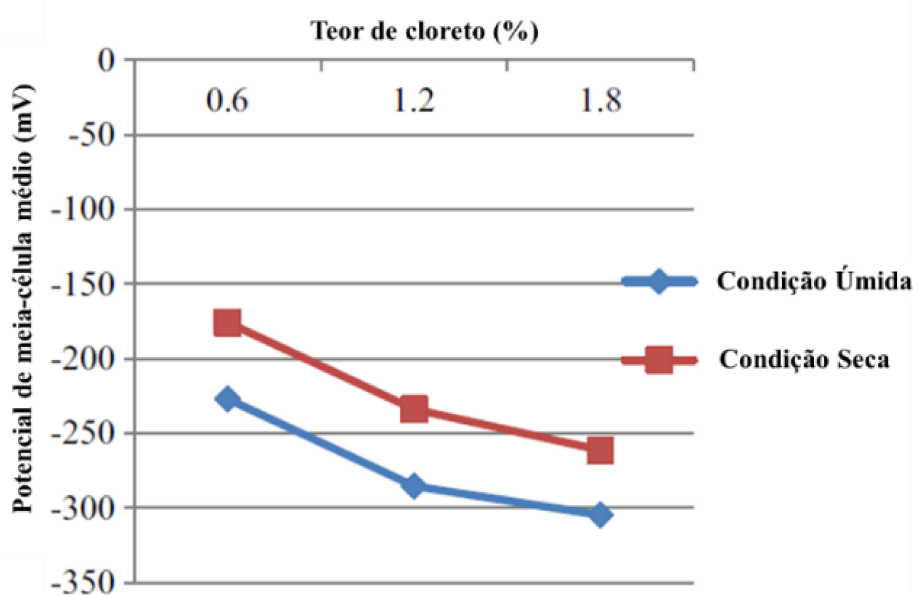
2.2.4.1.3 Influência da contaminação por cloretos

Os cloretos penetram no concreto e se o teor crítico de cloreto é atingido na zona das armaduras, o processo de corrosão se inicia. Devido à iniciação da corrosão, um campo potencial é estabelecido pelo fluxo resultante da corrosão. O aumento da taxa de corrosão provoca uma diminuição nos valores medidos de potencial de corrosão, ou seja, tornam-se mais negativos devido à elevação da condutividade elétrica proveniente dos íons cloretos no concreto (KEBLER; GEHLEN, 2016; ZOU et al., 2016; SOFI et al., 2019).

Yodsudjai e Pattarakittam (2017) verificaram que o potencial diminuiu à medida que o teor de cloreto aumentou, tanto para cura em condições úmidas, quanto secas, conforme Figura 78.

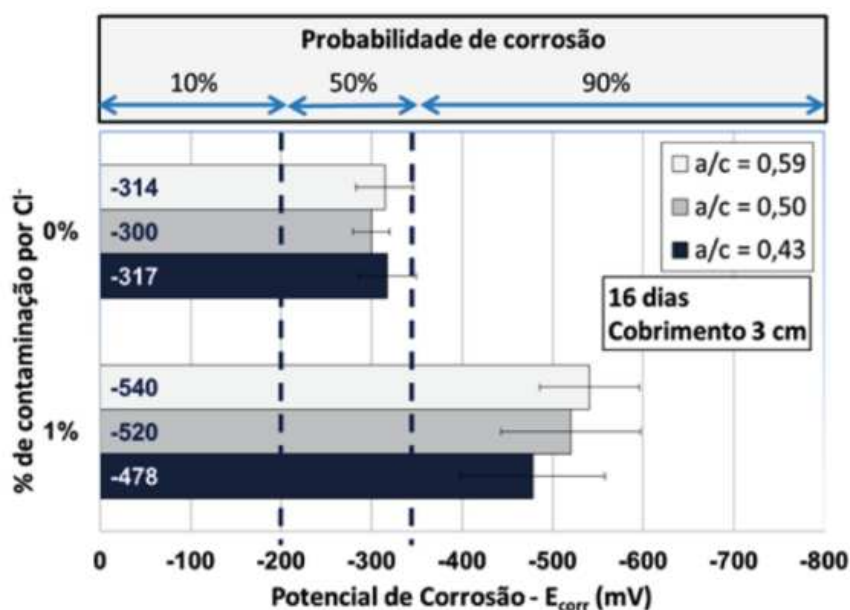
Medeiros et al. (2017) também notaram uma tendência de valores de potencial de corrosão mais negativos nos casos em que o concreto está contaminado com 1% de cloreto em relação à massa de cimento (Figura 79).

Figura 78. Relação entre valor do potencial e teor do cloreto



Fonte: Yodsudjai e Pattarakittam (2017).

Figura 79. Influência da contaminação por cloretos sobre o potencial de corrosão com $a/c=0,43; 0,50$ e $0,59$ – cobrimento = 3 cm



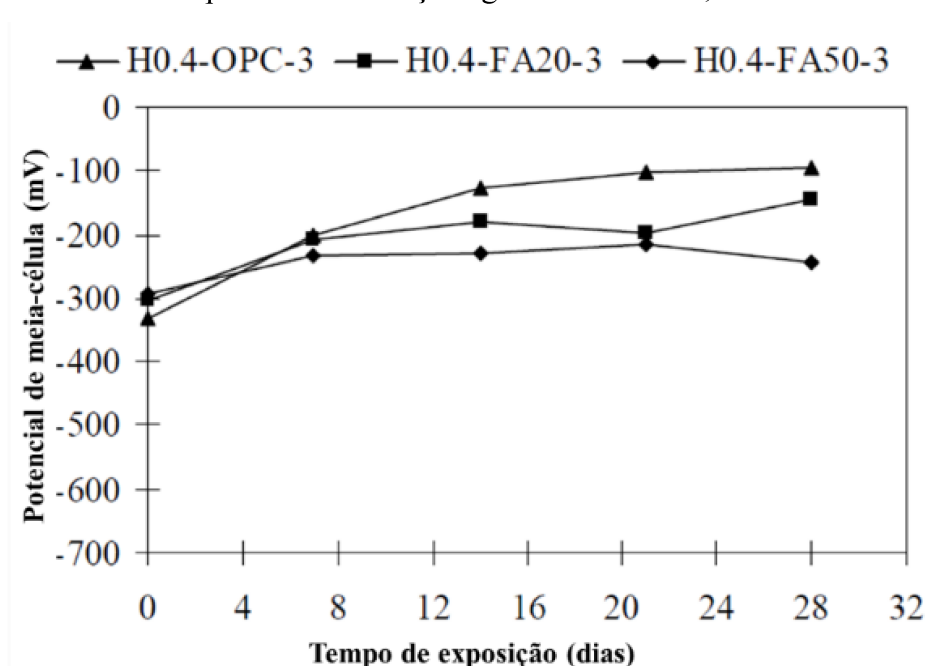
Fonte: Medeiros et al. (2017).

2.2.4.1.4 Influência da carbonatação

A carbonatação reduz a permeabilidade e a porosidade, originando consequentemente o aumento da densidade superficial e resistividade elétrica do concreto. E, à medida que a resistividade no concreto aumenta, a detecção de corrosão pela medição do potencial de corrosão torna-se mais difícil. Isto porque a resistividade muda o potencial das zonas anódicas para valores mais negativos e dos sítios catódicos para valores mais positivos, embora se tem sugerido que o potencial de corrosão se torna menos negativo após a carbonatação (POUR-GHAZ et al., 2009; CHANSURIYASAK et al., 2010; LI et al., 2020; GAWEL et al., 2021).

Nos estudos realizados por Chansuriyasak et al. (2010), os resultados da medição do potencial de corrosão de amostras sem adição de cinza volante (H0.4-OPC-3), com adição de 20% (H0.4-FA20-3) 50% de cinzas volantes (H0.4-FA50-3) expostas ao ambiente de dióxido de carbono, apresentaram valores menos negativos quando o tempo de exposição aumentou conforme mostrado na Figura 80.

Figura 80. Potencial de corrosão em amostras expostas ao ambiente de dióxido de carbono para mesma relação água-cimento de 0,4.



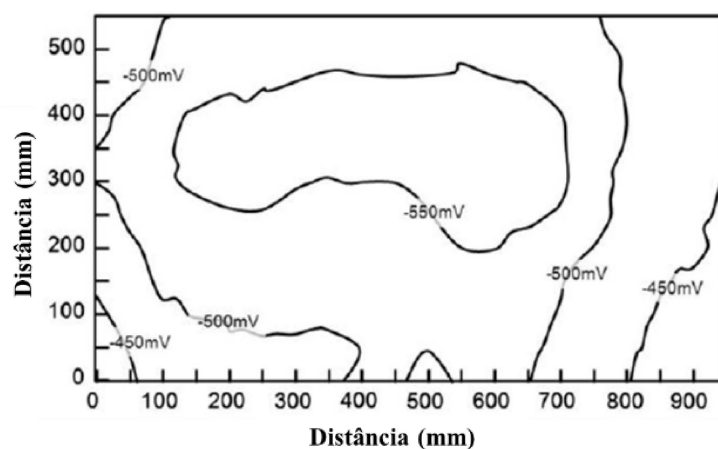
Fonte: Chansuriyasak et al. (2010).

2.2.4.2 Aplicação do método de potencial de corrosão

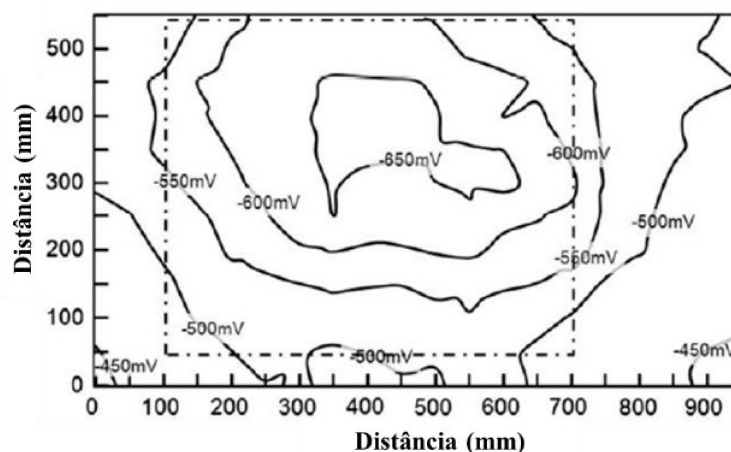
Este método tem sido utilizado na avaliação da durabilidade de elementos de concreto armado onde há suspeita de corrosão da armadura. Embora o valor do potencial de corrosão seja um parâmetro qualitativo, é o método mais comumente usado devido à vasta disponibilidade de ferramentas de medição e técnicas de avaliação bem estabelecidas. O uso, de modo específico, inclui a identificação de áreas de alto e baixo risco de corrosão da armadura através de gráficos de contorno que mostram o mapeamento dos resultados das medições do potencial de corrosão (CHRISTODOULOU et al., 2014; BABAEI et al., 2018; KIVISTE et al., 2019).

Para identificação de áreas afetadas pela corrosão induzida por cloretos em pavimentos de concreto, Christodoulou et al. (2014) usaram o gráfico de contorno mostrando resultados do mapeamento do potencial de corrosão, antes e após 30 dias do reparo da estrutura, segundo a Figura 81 para uma área de 0,95 x 0,55 m.

Figura 81. Mapeamento de potencial de corrosão da superfície da estrutura: (a) antes do reparo e (b) 30 dias após reparo



a)

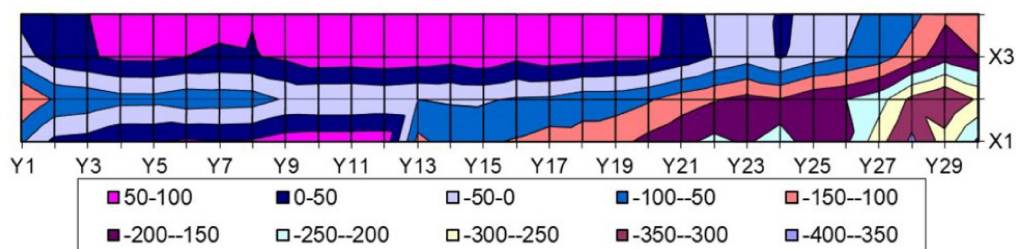


b)

Fonte: Christodoulou et al. (2014).

Kiviste et al. (2019) apresentaram o mapeamento do potencial de meia célula para avaliação do risco de corrosão de painéis nervurados de concreto protendido após 20 anos de serviço, de acordo com a Figura 82.

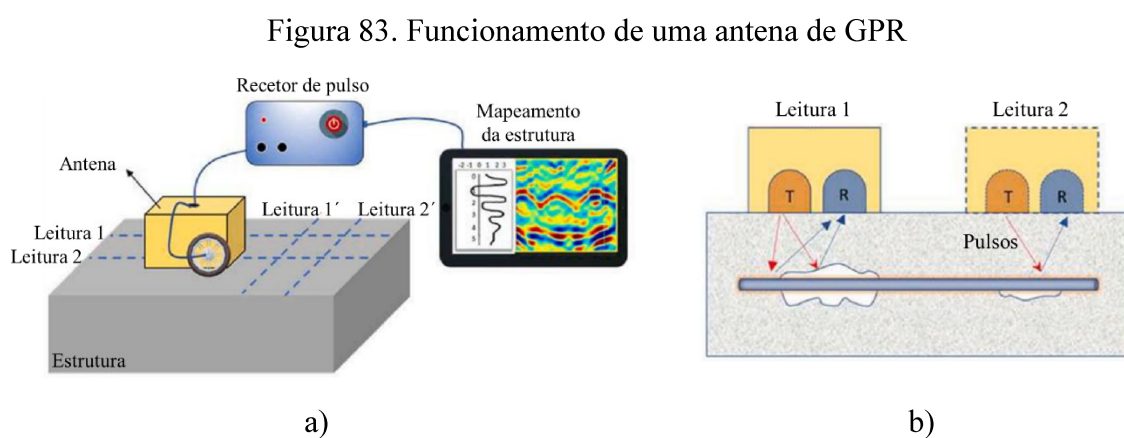
Figura 82. Mapa de potencial de meia célula (mV), para painel nervurado



Fonte: Kiviste et al. (2019).

2.2.5 Radar de penetração no solo - GPR

O radar de penetração no solo (GPR) ou Georradar é um método de ensaio não destrutivo que usa ondas eletromagnéticas para obter imagens da sub-superfície das estruturas. O sistema GPR opera emitindo pequenos pulsos eletromagnéticos na superfície da estrutura e registrando os sinais refletidos quando estas ondas atingem materiais de diferentes propriedades dielétricas no interior da estrutura (ZATAR et al., 2022). Um gráfico da intensidade do sinal refletido sobre o tempo de viagem bidirecional registrado, ajuda na localização desses materiais. Uma antena de GPR típica, consiste em um transmissor e um receptor da onda, conforme ilustrado na Figura 83. O transmissor emite pulsos de ondas eletromagnéticas em espaços de tempos definidos. Eles se espalham nas interfaces do meio com mudança repentina nas propriedades dielétricas. O receptor coleta todos os pulsos que chegam, após espalhamento e reflexões múltiplas. As recepções de sinal no domínio do tempo são usadas para mapear materiais subjacentes na estrutura e podem ser interpretados pela construção de imagem 2D ou 3D (ZHAO et al., 2018; KUCHIPUDI et al., 2022).



Fonte: Adaptado de Kuchipudi et al. (2022).

Algumas das principais áreas para a implementação desse método incluem a detecção do aço embutido e a estimativa do seu diâmetro, monitoramento de fissuras e discontinuidades (TARUSSOV et al., 2013; TASKER et al., 2018; ZAKI et al., 2018; TOSTI; FERRANTE, 2019; ZHENG et al., 2022).

3 PLANEJAMENTO E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa, foram estudados dormentes de concreto protendido do tipo monobloco confeccionados segundo a NBR 11709 (ABNT, 2015). O concreto utilizado na confecção dos dormentes possui resistência característica (f_{ck}) superior à 45 MPa de acordo com a classe de resistência C45 da NBR 8953 (ABNT, 2015).

3.1 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os dormentes foram recebidos na estação de ensaios da Faculdade de Engenharia Civil da UFU-FECIV – onde se desenvolveu a pesquisa – e apresentavam elevada concentração de pó de minério de ferro depositado nas superfícies. Assim, o procedimento após a recepção, foi a higienização por lavagem com água potável conforme Figura 84.

Figura 84. Higienização dos dormentes



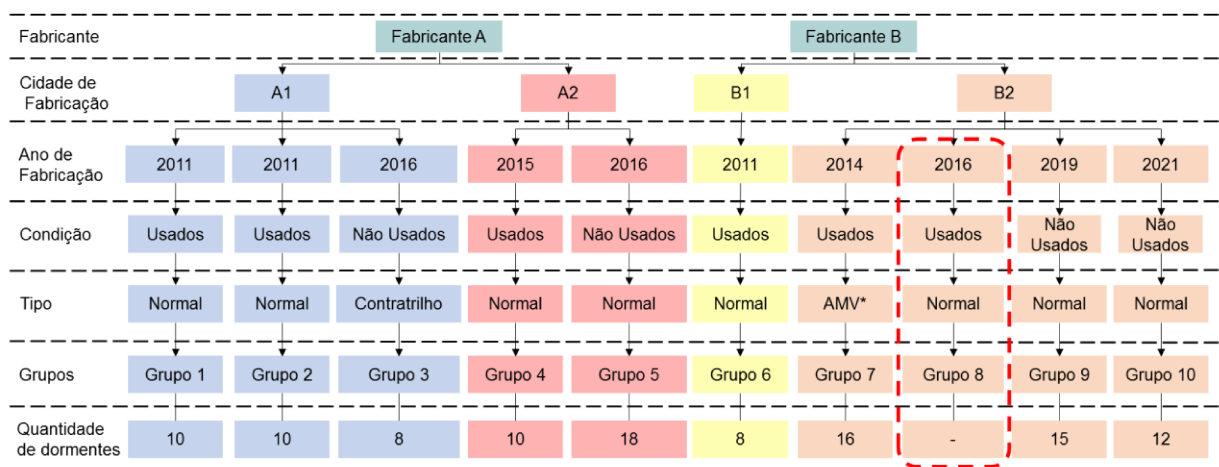
Após a higienização os dormentes foram divididos em 10 grupos amostrais diferentes. E para facilitar a identificação de cada dormente em seu respectivo grupo, foi gerado um código de resposta rápida (QR Code) que foi fixado em uma das faces do dormente conforme Figura 85.

Figura 85. Identificação dos dormentes por QR Code



Para o agrupamento dos dormentes, teve-se como base as características em relação à: fabricante, cidade de fabricação, ano de produção, condição de uso e tipo de dormente. Com esse critério, foi possível gerar o organograma da Figura 86.

Figura 86. Organograma dos grupos de dormentes sob estudo



* Aparelho de mudança de via

No organograma da Figura 86 é possível identificar a diferenciação entre dois fabricantes, sendo cada um deles com duas cidades distintas utilizadas para fabricação dos dormentes. Essa variável será levada em consideração quanto a utilização de materiais para fabricação dos dormentes, visto que em cada região, a disponibilidade de matéria-prima é diferente, conseqüentemente o comportamento do concreto endurecido também. Além disso, pode-se notar que a quantidade de dormentes para o grupo 8 não foi apresentada. Isto deve-se ao fato deste mesmo grupo ter sido identificado, mas não ter chegado à estação de ensaio.

Quanto ao ano de fabricação, os dormentes possuem uma faixa de idade de 1 a 11 anos, sendo respectivamente fabricados entre 2011 e 2021. Dentro dessa faixa de idade é possível observar outros anos de fabricação, são eles: 2014, 2015, 2016 e 2019, conforme Quadro 3. O tempo a qual esses dormentes estão expostos é uma variável de grande relevância visto que as manifestações patológicas em elementos de concreto são influenciadas pelo tempo de exposição ao meio agressivo.

Quadro 3. Quantidade de dormentes por ano de fabricação

Ano de fabricação	2011	2014	2015	2016	2019	2021
Quantidade de dormentes	28	16	10	26	15	12

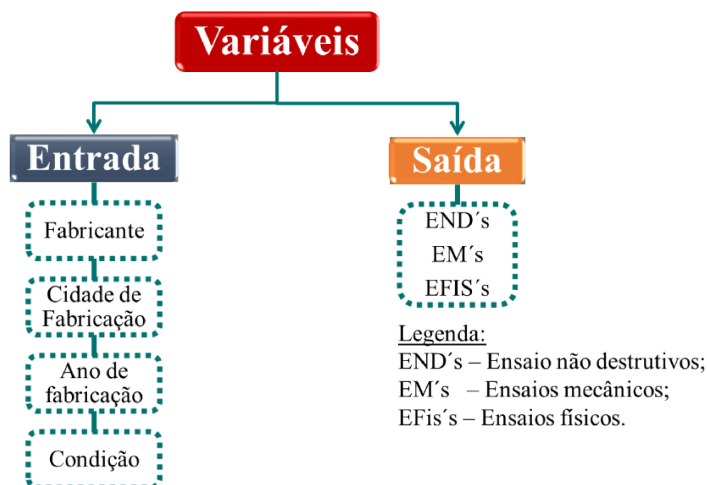
Em relação à condição de uso, as peças retiradas da ferrovia são chamadas de “usados”, já os elementos que não chegaram a ser implementados na ferrovia e se encontravam empilhados próximos a linha férrea são identificados como “não usados”. Essa variável é contabilizada como um diferencial, pois o local a qual o dormente está exposto influencia na existência ou não de manifestações patológicas. Ainda, as solicitações mecânicas no dormente durante a sua utilização na ferrovia podem provocar e/ou acelerar a ocorrência de fissuração e, conseqüentemente, facilitar a entrada de agentes agressivos. O Quadro 4 apresenta a quantidade de dormente para cada condição.

Quadro 4. Quantidade de dormentes usados e não usados

Condição do dormente	Usado	Não usado
Quantidade de dormentes	54	53

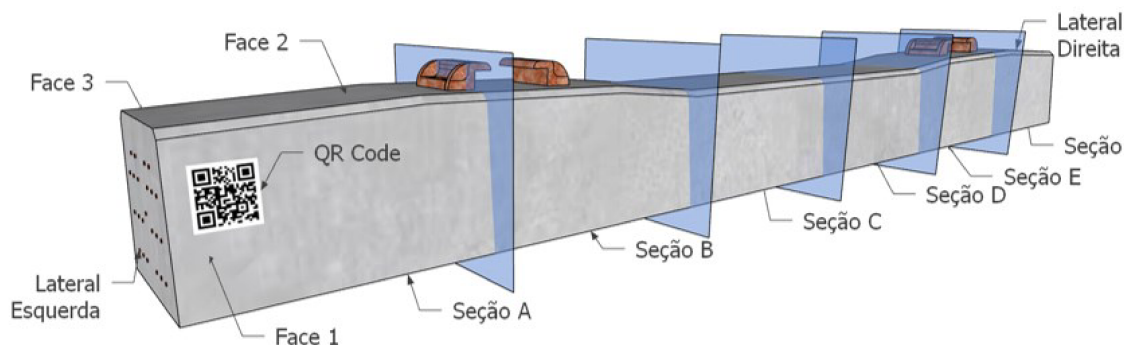
Sendo assim, às variáveis de estudo estão apresentadas na Figura 87 e estão divididas em variáveis de entrada e de saída.

Figura 87. Variáveis de estudo



Para a realização dos ensaios não destrutivos em todos os dormentes de cada grupo e tendo em vista a obtenção de dados mais representativos, os dormentes foram divididos em seções (A, B, C, D, E e F) para cada face (1, 2 e 3) e em cada seção (ver Figura 88) foi realizado a medição para os ensaios não destrutivos previstos.

Figura 88: Divisão do dormente em seção para a realização dos ensaios não destrutivos



Após a delimitação dos dormentes em seções, foi realizado o ensaio de pacometria, para localização das armaduras afim de evitar sua interferência na realização dos demais ensaios. Para demarcação da presença de armaduras foi utilizado um barbante em volta do dormente objetivando facilitar visualmente a disposição das barras de aço que se encontraram dispostas conforme Figura 89. Em seguida realizou-se os ensaios de esclerometria, ultrassom, módulo de elasticidade dinâmico por ultrassom, resistividade elétrica superficial, potencial de corrosão das armaduras, tomografia por ultrassom e georadar (GPR).

Figura 89 : Marcação das armaduras



3.1.1 Ensaio de esclerometria

O ensaio de esclerometria foi realizado segundo a norma ABNT NBR 7584 (2012), sendo o mesmo representado pela norma americana ASTM C 805-18. O ensaio consistiu em efetuar 16 impactos em espaços de 150 x 150 mm (ver Figura 90) utilizando o esclerômetro (ver Figura 91a). Para realização foram levados em conta os fatores que podem afetar as medições tais como: carbonatação, textura da superfície e umidade superficial. Os locais onde foram realizados os rebotes encontravam-se secos, planos e livre da armadura que foi identificada através da delimitação apresentada na Figura 91b. Os pontos de impacto foram espaçados a uma distância de 3 cm conforme Figura 91c para cada uma das seis seções dispostas nas faces 1, 2 e 3, com o objetivo de determinar o índice de esclerometria que resultou da média aritmética dos valores dos impactos aplicados em cada seção. O total de medições para cada dormente foi de 18 medições, sendo 6 medições para cada face. O ensaio foi realizado ortogonalmente à área da face conforme Figura 91d.

Figura 90: Disposição dos impactos do ensaio de esclerometria

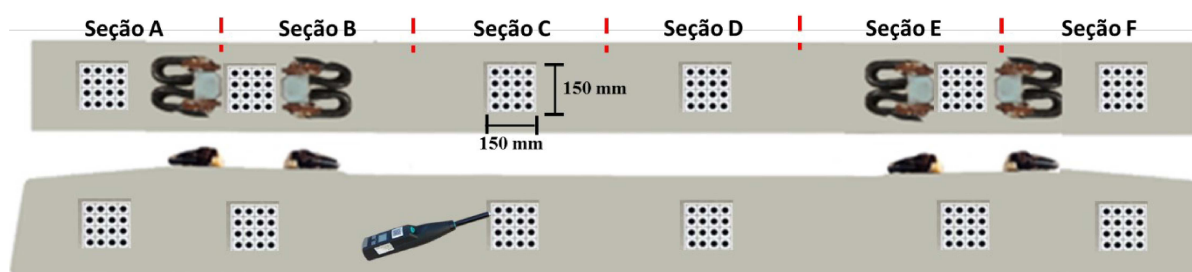


Figura 91: Esquema das etapas do ensaio de esclerometria (a-d)

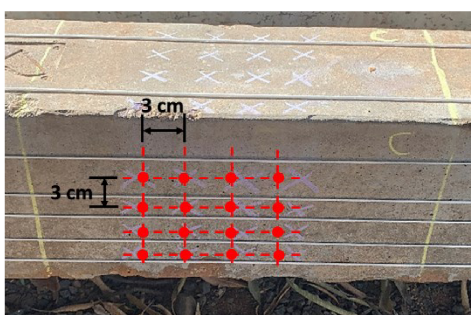
- a) Equipamento a utilizar no ensaio de esclerometria.



- b) Delimitação da localização das barras de aço.



- c) Marcação dos 16 impactos por seção.



- d) Realização do ensaio nas faces 1 e 3.



3.1.2 Ensaio de ultrassom

Este ensaio foi realizado segundo a norma ABNT NBR 8802 (2019) e ASTM C 597, 2016 com a utilização do equipamento com transdutor de 1662 mm^2 e frequência de 54 kHz (Figura 92a). Durante a realização do ensaio foram levados em conta a umidade e a presença de armadura no dormente devido à interferência desses fatores no valor medido da velocidade da onda. Para realização desse ensaio foi usado gel (ver Figura 92b) para acoplamento dos transdutores de onda compressiva e antes de qualquer medição foi feita a calibração do aparelho através da utilização de um gabarito com velocidade de pulso já conhecida conforme Figuras 92c. O modo de transmissão de onda foi o direto, realizado entre as faces 1-3 (Figura 92d) e o indireto em todas as seções para a face 2 (superior). O total de medições para cada dormente será de 18 medições no modo de transmissão direta, sendo três medições em cada seção para as faces 1 e 3 conforme o esquema da Figura 93 e o valor da velocidade da onda para cada seção resultou da média aritmética das três medições. Para o modo de transmissão indireto foram efetuadas 5 medições.

Figura 92: Esquema das etapas do ensaio de ultrassom

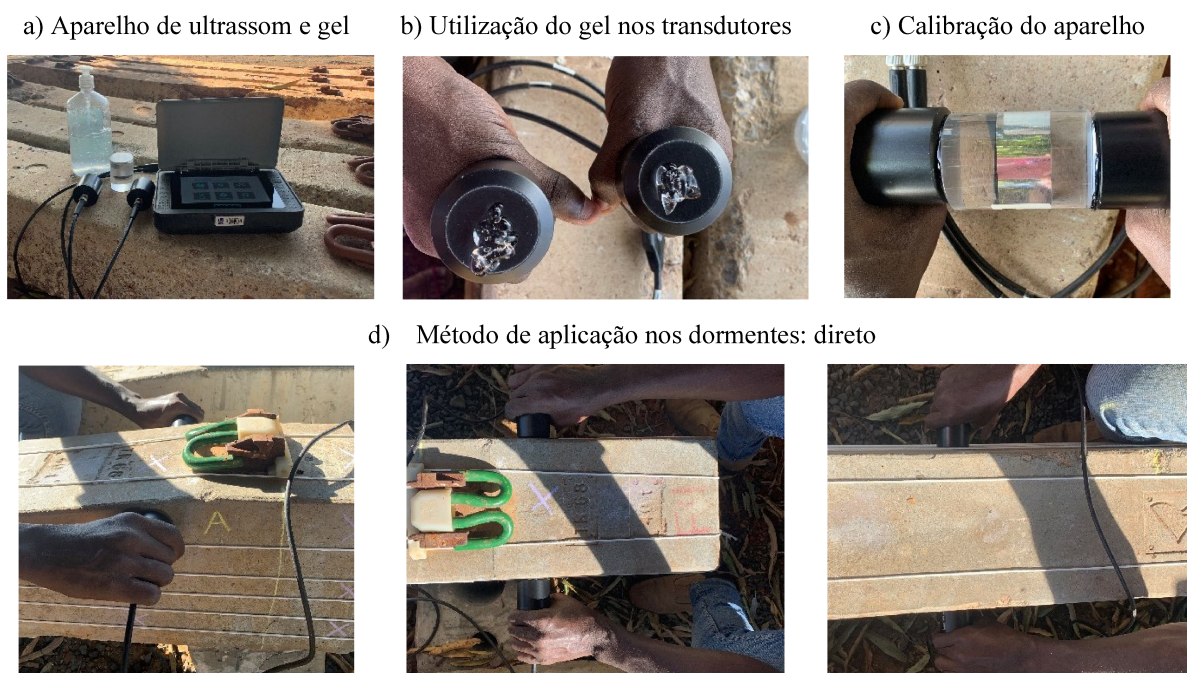
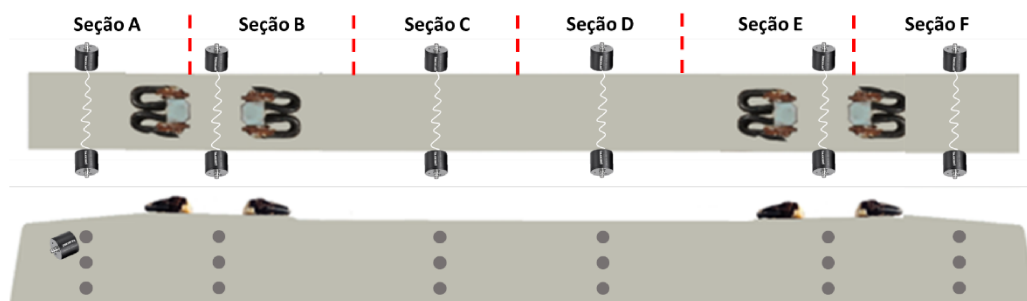


Figura 93: Esquema da posição dos transdutores em cada seção para realização do ensaio de ultrassom



3.1.3 Módulo dinâmico por ultrassom

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado segundo a ASTM D 2845 (2008), utilizando equipamento com transdutor de frequência de 54 kHz para onda compressiva (onda P) e transdutor de contato seco de 50 kHz para onda cisalhante (onda S) (Figura 94a). Para realização desse ensaio, o equipamento foi calibrado para cada transdutor através da utilização de gabarito de cada transdutor com velocidade de pulso já conhecida conforme Figuras 94b e 94c. O método de transmissão da velocidade da onda foi o direto, tanto para ondas compressivas e quanto para as ondas cisalhantes (Figuras 94d e 94e). Da aplicação combinada das duas ondas através das faces 1 e 3, resultou o módulo dinâmico de cada seção. Foi feita a medição do

módulo em um ponto de cada seção conforme Figura 95, através das faces 1 e 3 totalizando 6 medições para cada dormente.

Figura 94: Esquema para realização do ensaio de módulo dinâmico por ultrassom.

a) Aparelho para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico



b) Calibração com transdutor de onda compressiva



c) Calibração com transdutor de onda cisalhante



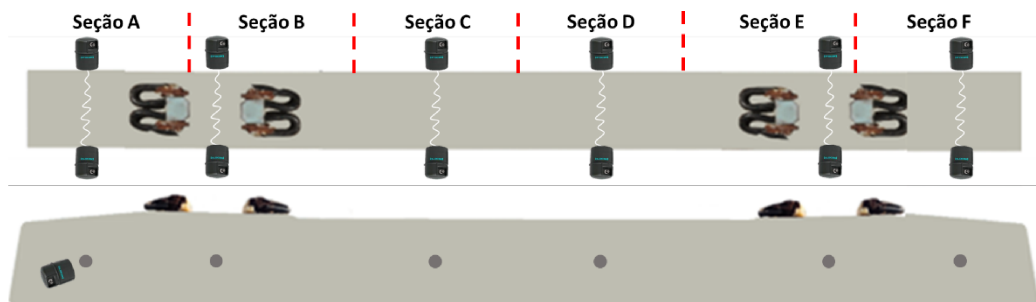
d) Aplicação da onda compressiva (método direto)



e) Aplicação da onda cisalhante (método direto)



Figura 95: Posição dos transdutores para ensaio de módulo dinâmico (faces 1-3).



3.1.4 Resistividade elétrica superficial do concreto

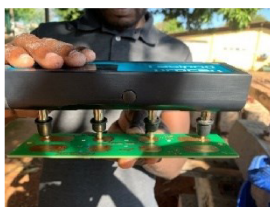
Este ensaio foi realizado segundo as adaptações da norma ASTM G 57 (2020) utilizando o equipamento mostrado na Figura 96a, que funciona segundo o método dos 4 pontos dispostos em um arranjo Wenner. O aparelho foi calibrado com a utilização de um gabarito com resistividade elétrica conhecida (Figura 96b). Antes das medições os dormentes foram saturados mantendo a superfície seca, foram evitadas medições em locais com armadura embutida e a realização dos ensaios em dia com grandes oscilações de temperatura devido à interferência do fator temperatura e umidade. Para cada face, o ensaio foi realizado nas seções A, C, D e F conforme as Figuras 96c e 96d, obedecendo o esquema da Figura 97. O total de medições para cada dormente foi de 36, sendo 3 em cada seção para as faces 1, 2 e 3. O valor da resistividade de cada seção resultou da média aritmética das três medições. As seções B e E foram evitadas na medição, por se tratar de uma região fortemente armada devido às armaduras de fixação dos trilhos.

Figura 96: Esquema para realização do ensaio de resistividade superficial

a) Aparelho para obtenção da resistividade elétrica



b) Calibração do aparelho



c) Marcação das 3 alturas de ensaio



d) Medição em 3 alturas entre as barras



Figura 97: Posição do equipamento de resistividade elétrica em cada seção



3.1.5 Ensaio de potencial de corrosão das armaduras

Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM C 876 (2015) utilizando o equipamento que utiliza o método da meia célula para determinação do potencial de corrosão (Figura 98a). Para início do ensaio o eletrodo de referência foi preenchido com a solução de cobre/sulfato de cobre diluído em água (Figura 98b). O gancho do terminal positivo foi conectado nas armaduras expostas lateralmente (Figura 98c) após a devida limpeza da armadura devido à impurezas. Para cada face, o ensaio foi realizado nas seções A, C, D e F (Figura 97d) e obedecendo o esquema da Figura 99. O total de medições para cada dormente foi de 144, sendo 12 em cada seção para as faces 1, 2 e 3. O valor do potencial encontrado será apresentado em forma de mapa e cada medição será registada conforme esquema referido anteriormente. As seções B e E foram evitadas na medição, por se tratar de uma região fortemente armada devido às armaduras de fixação dos trilhos.

Figura 98: Esquema para realização de leitura de potencial de corrosão

- a) Equipamento para ensaio de potencial de corrosão b) Eletrodo de referência de sulfato de cobre



c) Grampo do equipamento ligado a conexão



d) Execução do ensaio



Figura 99: Posições para ensaio do eletrodo de potencial



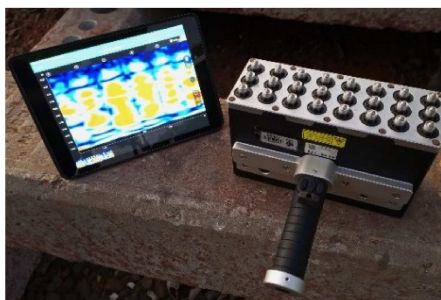
3.1.6 Ensaio de tomografia por ultrassom

O ensaio de tomografia foi realizado utilizando um equipamento de ultrassom de pulso eco de ondas cisalhantes de 50 kHz (Figura 100a). Ele possui 8 canais de transdutores que emitem e recebem os pulsos simultaneamente, formando 56 sequencias de imagens que aparecem na tela do tablet, apresentada com escala de cores em relação às velocidades de pulso registradas na medição (ver Figura 100b). Para medição, o equipamento foi pressionado perpendicularmente à face 1 de cada dormente conforme Figura 100c. As leituras de tomografia por ultrassom foram realizadas em duas alturas da face 1 de cada dormente, conforme esquema apresentado na Figura 101.

Figura 100: Esquema para realização de tomografia ultrassônica



a)

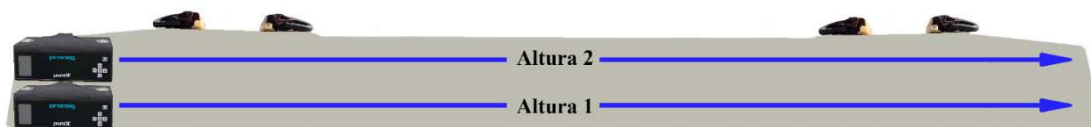


b)



c)

Figura 101: Posições para ensaio de tomografia



3.1.7 Ensaio de georadar (GPR)

De forma a contribuir para melhor interpretação dos resultados dos ensaios de tomografia por ultrassom, foram realizadas leituras com georadar (GPR). Ele consiste em um gerador de impulso, que repetidamente envia pulsos elétricos em frequência específica através de uma antena transmissora (ver Figura 102a). As leituras com o GPR foram realizadas na face 1 de cada dormente e as imagens geradas foram apresentadas no tablet como mostrado na Figura 102b. Como o aparelho possui largura muito próxima à da face do dormente, foi feita apenas uma única leitura conforme esquema da Figura 103.

Figura 102: Esquema para realização de georadar



a)



b)

Figura 103: Posições para ensaio de georadar



Em todos os dormentes recebidos na estação foram realizados os ensaios não destrutivos apresentados acima. Deste modo utilizou-se 107 dormentes, com exceção da quantidade de dormentes do grupo 8. O Quadro 5 apresenta o total de medições a efetuar para cada ensaio não destrutivo.

Quadro 5. Número de medições a efetuar para cada ensaio não destrutivo.

Item	Esclerometria	Ultrassom	Módulo dinâmico	Resistividade e elétrica	Potencial de corrosão	Tomografia	Georradar
Face 1	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Face 2	Sim	sim	Não	Sim	Sim	Não	Não
Face 3	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não
Face 1-3	Não	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
Medições em um dormente	18	19	6	36	144	2	1
Medições em todos dormentes	1926	2033	642	3852	15408	214	107

3.2 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS DESTRUTIVOS

Com objetivo de estabelecer correlação e garantir confiança dos resultados dos ensaios não destrutivos, após a realização dos ensaios descritos anteriormente, foi selecionado aleatoriamente dois dormentes em cada grupo e destes foram extraídos 12 (doze) testemunhos cada, com diâmetro de 50 mm e altura variável de acordo com a altura do dormente na zona extraída, e com estes testemunhos foram feitos os ensaios físicos (índice de vazios e absorção por capilaridade) e ensaio mecânico (resistência à compressão).

3.2.1 Extração de testemunho

A extração dos testemunhos foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7680: 2015, no sentido paralelo ao de lançamento do concreto. Os corpos de prova foram extraídos utilizando uma extratora/perfuratriz para concreto com potência nominal de 3200 W provida de cálice e coroa diamantada de diâmetro de 50 mm conforme Figura 104. Dos doze testemunhos extraídos de cada dormente, seis deles estavam localizados na extremidade (ombros) do dormente (seção A e seção F) e os outros seis localizado na posição central (seção B à seção E) conforme se pode observar na Figura 105.

Figura 104: Extração de testemunhos

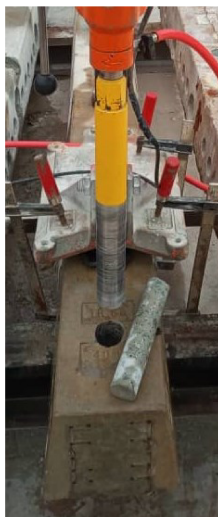
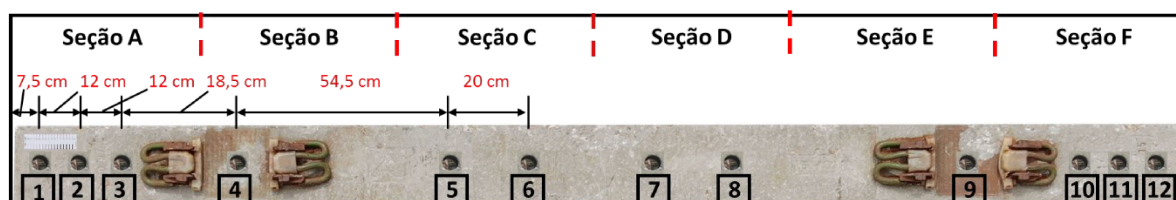
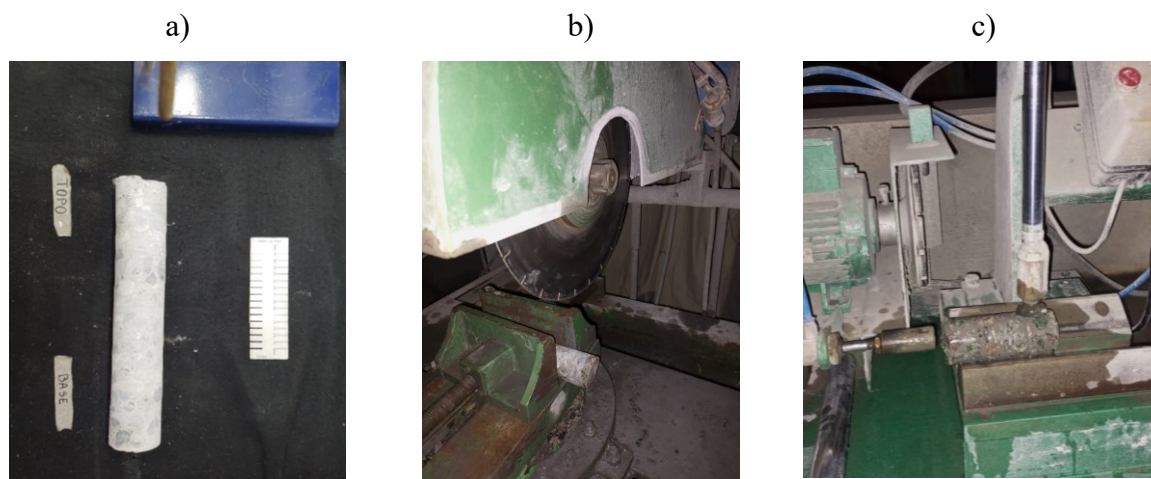


Figura 105: Posição dos pontos para extração de testemunhos



Foram extraídos um total de 216 testemunhos, e o processo de extração foi documentado com fotos conforme Figura 106a, identificando o testemunho extraído, o posicionamento do furo no dormente de acordo com a Figura 105 e para permitir a verificação de existência ou não de segregação na região de extração. Todos aqueles testemunhos que apresentaram alterações internas (descontinuidades) e heterogeneidade do concreto, foram descartados e outro testemunho foi extraído. Em seguida os mesmos foram cortados nas dimensões normalizadas para cada ensaio (mecânico e físico), com o auxílio de uma bancada de corte para blocos de concreto com serra diamantada conforme ilustrado na Figura 106b. Assim foram preparados os topos dos testemunhos cortados para posteriores ensaios. Os topos foram regularizados por meio de retífica manual conforme Figura 106c, e em alguns casos fez-se o capeamento com uma camada fina de enxofre, de maneiras a garantir um faceamento preciso e uniforme para que as extremidades estivessem perpendiculares às laterais do testemunho durante a realização do ensaio mecânico (resistência à compressão).

Figura 106: Preparação dos testemunhos para ensaios físicos e mecânicos



3.2.2 Ensaio mecânico (resistência à compressão)

Após estarem preparados os corpos de prova, foi realizado o ensaio de resistência à compressão. Este ensaio foi realizado com objetivo de se ter uma ideia geral da qualidade do concreto dos dormentes de cada grupo. O ensaio foi realizado segundo a NBR 5739 (ABNT, 2018), utilizando uma prensa hidráulica com célula de carga de 600 kN e taxa de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s (ver Figura 107a). A quantidade de corpos de provas utilizado encontram-se no Quadro 6, com exceção do grupo 8. Cada um dos corpos de prova utilizados teve relação altura/diâmetro mais próxima possível de 2 após preparo (ver Figura 107b), obedecendo sempre a condição abaixo.

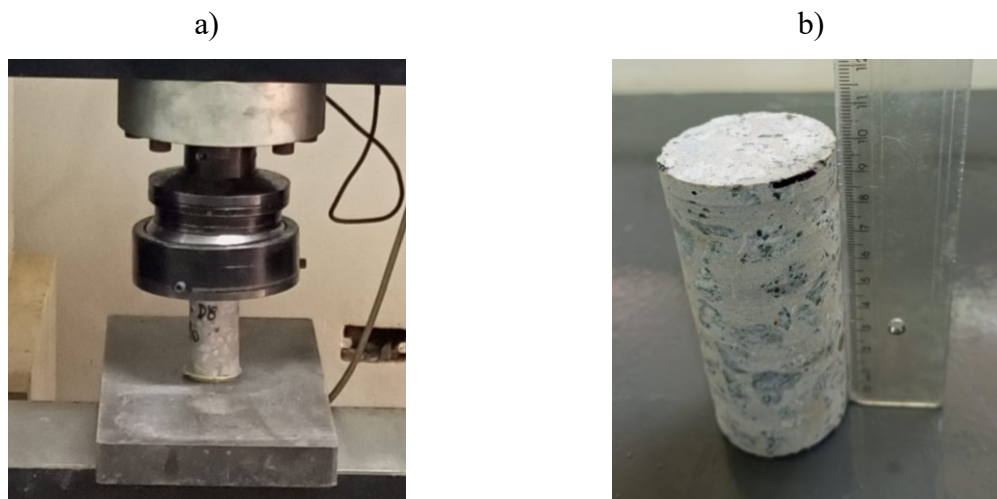
$$1 \leq h/d \leq 2$$

Onde: h é a altura e d o diâmetro do testemunho, ambos em cm.

Quadro 6. Quantidade de testemunhos para ensaio de resistência à compressão.

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de corpo de prova	12	12	12	12	12	12	12	-	12	12
Quantidade total de corpo de prova	108									

Figura 107: Ensaio de resistência à compressão



3.2.3 Ensaios físicos

Índice de vazios e absorção de água por capilaridade

Estes ensaios foram realizados com objetivo de avaliar a densidade da massa do concreto dos dormentes de cada grupo a fim de permitir a interpretação eficaz dos ensaios não destrutivos e mecânico.

O ensaio de índice de vazios foi realizado segundo a NBR 9778 (ABNT; 2009), utilizando uma balança hidrostática e digital (ver Figura 108a), estufa e uma autoclave (ver Figura 108b) para submissão dos testemunhos à ebulição. Em cada testemunho extraído para ensaio de resistência à compressão as extremidades inferiores (ver Figura 108c) foram usados para realização dos ensaios. A quantidade de testemunhos utilizados neste ensaio encontra-se no Quadro 7.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo a NBR 9779 (ABNT; 2012), utilizando estufa, balança (ver Figura 108d), recipiente com dimensões internas apropriadas para armazenar corpos de prova e que garantiu um nível de água constante, contendo suporte metálico na sua base a fim de manter o corpo de prova afastado do fundo do recipiente, o que permitiu um contato efetivo entre a sua face inferior e a água (ver Figura 108e). Em cada testemunho extraído para ensaio de resistência à compressão as extremidades

superiores (ver Figura 108c) foram usados para realização deste ensaio. A quantidade de testemunhos utilizados neste ensaio encontra-se no Quadro 8.

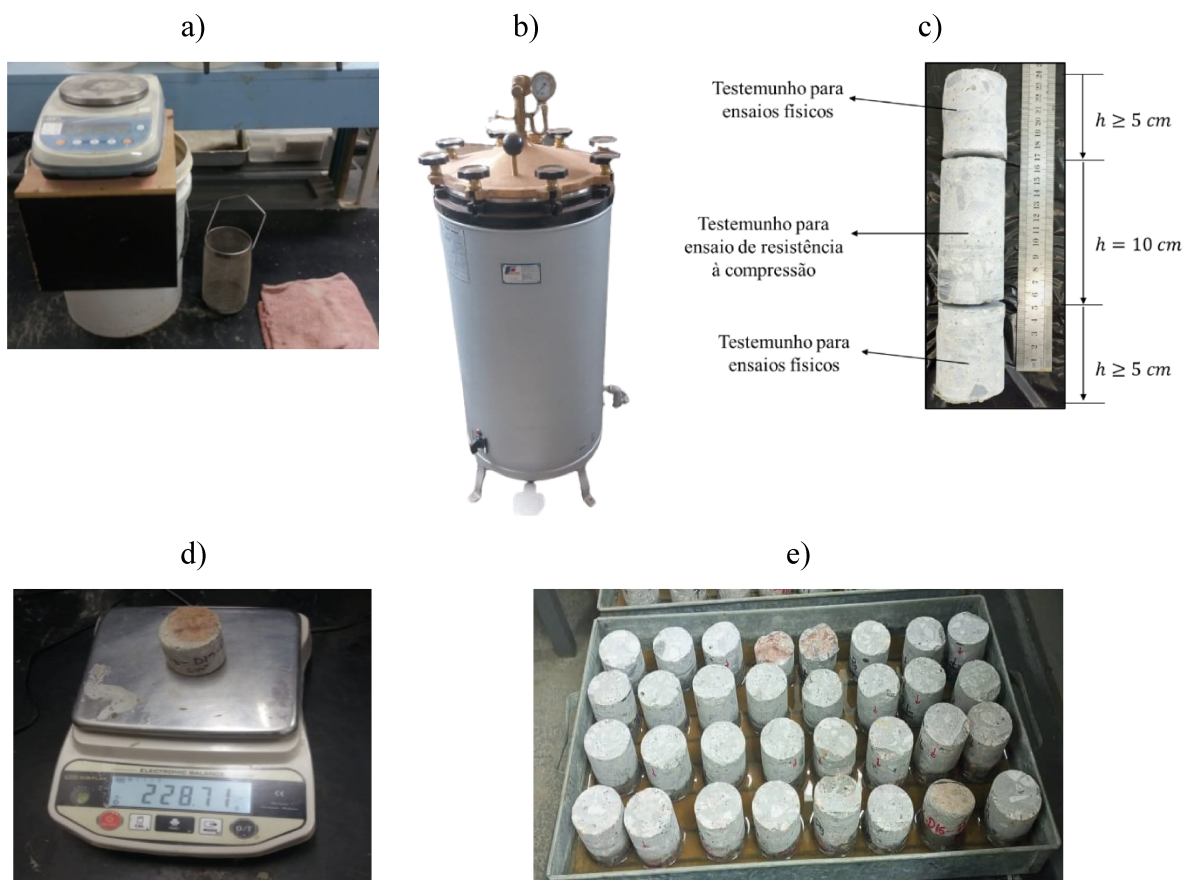
Quadro 7. Quantidade de testemunhos para ensaio de absorção de água e índice de vazios

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de corpo de prova	12	12	12	12	12	12	24	-	12	12
Quantidade total de corpo de prova	108									

Quadro 8. Quantidade de testemunhos para ensaio de absorção de água por capilaridade

Grupos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Quantidade de corpo de prova	12	12	12	12	12	12	24	-	12	12
Quantidade total de corpo de prova	108									

Figura 108: Equipamentos e amostra para ensaio de absorção de água e índice de vazios



3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

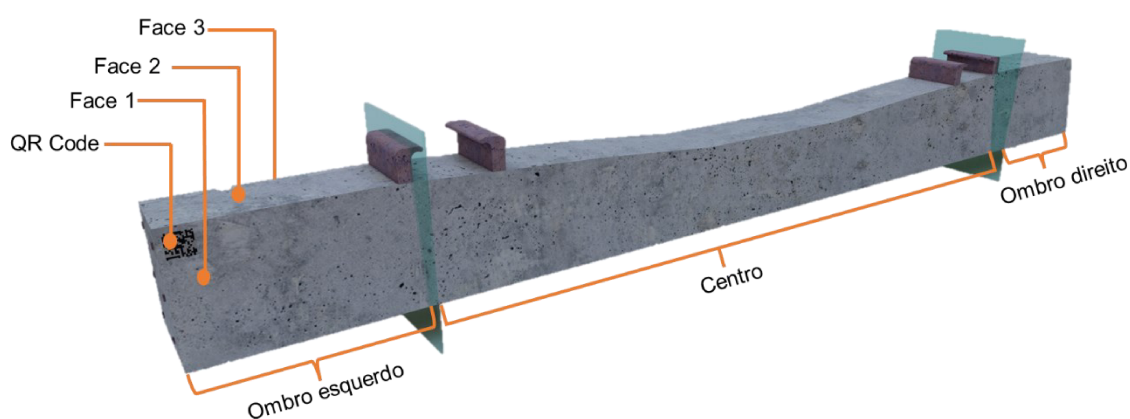
Com exceção dos ensaios de tomografia por ultrassom, georadar e potencial de corrosão, para a análise dos resultados de todos os ensaios realizados, foi seguido as seguintes etapas que compreendem o tratamento estatístico dos resultados obtidos:

- Aplicação do critério de *Chauvenet* e plotagem de gráficos no programa computacional *JAMOV* para identificação e posterior eliminação dos dados considerados errôneos (*outliers*).
- Verificação da normalidade pelo método de *Shapiro-Wilk* usando o programa computacional *JAMOV*.
- Verificação da hipótese de igualdade entre as variâncias dentro de cada grupo pelo teste de *Levene's* através do programa computacional *JAMOV*. Se rejeitada a hipótese de igualdade das variâncias, os grupos não podem ser analisados em conjunto, e sim combinados em pares. Se aceite a hipótese de igualdade das variâncias dentro dos grupos, a análise de igualdade entre os grupos é feita por meio do quadro ANOVA. Se rejeitada a hipótese de igualdade entre os grupos, a verificação de qual média difere das demais, é realizada pelo teste de *Tukey* utilizando o programa computacional *JAMOV*.

4 RESULTADOS OBTIDOS

O presente capítulo contempla a apresentação dos resultados obtidos nesta pesquisa, conforme programa experimental proposto. Inicialmente apresenta-se os resultados dos ensaios não destrutivo, seguido pelo ensaio mecânico e ensaios físicos. Os resultados são apresentados seguindo o esquema da Figura 109 e fazem referência às regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito de cada face.

Figura 109: Delimitação do dormente para apresentação dos resultados



4.1 RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Abaixo segue os resultados obtidos dos ensaios não destrutivos realizados.

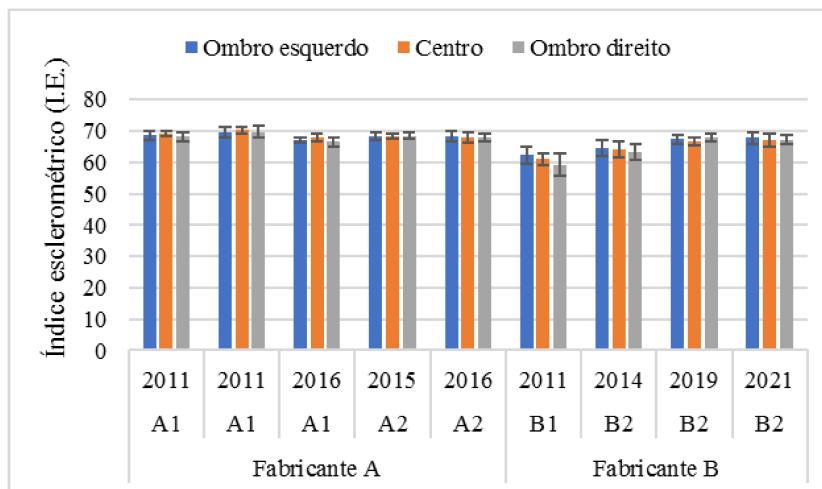
4.1.1 Ensaio de esclerometria

A tabela 7 e o gráfico da figura 110 apresentam os resultados do ensaio de esclerometria da face 1 para as regiões dos ombros (esquerdo e direito) e centro. Observa-se que para o fabricante A, o grupo 2 apresenta maior valor de esclerometria e o grupo 3 o menor valor. O grupo 2 em relação aos grupos 1, 3, 4 e 5 apresenta valor maior em cerca de 1,60%, 4,14%, 2,22% e 2,64%, respectivamente. Para o fabricante B, o grupo 10 apresenta maior valor de esclerometria e o grupo 6 o menor valor. O grupo 10 em relação aos grupos 6, 7 e 9 apresenta valor maior em cerca de 10,58%, 5,35% e 0,11%, respectivamente.

Tabela 7. Resultados do ensaio de esclerometria para face 1
Índice esclerométrico (I.E.) – faces 1

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito		
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
1	A	A1	2011	Usados	68,67	1,41	69,31	0,87	68,22	1,39	
2		A1	2011	Usados	69,60	1,51	70,25	0,95	69,80	1,87	
3		A1	2016	Não usados	67,00	0,82	67,81	1,22	66,50	1,51	
4		A2	2015	Usados	68,40	1,17	68,19	0,83	68,50	1,18	
5		A2	2016	Usados	68,43	1,79	67,90	1,60	67,92	1,44	
6		B1	2011	Usados	62,25	2,66	61,16	1,87	59,25	3,58	
7		B2	2014	Usados	64,38	2,53	64,14	2,33	63,20	2,43	
9		B	B2	2019	Não usados	67,29	1,44	66,53	1,31	67,93	1,21
10		B2	2021	Não usados	67,82	1,89	66,90	2,11	67,27	1,56	

Figura 110: Resultado do ensaio de esclerometria face 1

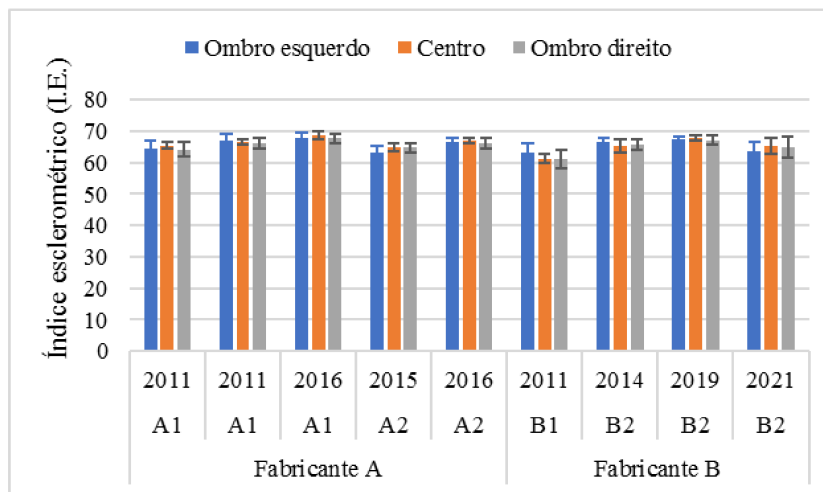


A tabela 8 e o gráfico da figura 111 apresentam os resultados do ensaio de esclerometria da faces 2. Observa-se que para o fabricante A, o grupo 3 apresenta maior valor de esclerometria e o grupo 4 o menor valor. O grupo 3 em relação aos grupos 1, 2, 4 e 5 apresenta valor maior em cerca de 5,26%, 2,21%, 5,79% e 2,38%, respectivamente. Para o fabricante B, o grupo 9 apresenta maior valor de esclerometria e o grupo 6 o menor valor. O grupo 9 em relação aos grupos 6, 7 e 10 apresenta valor maior em cerca de 8,90%, 2,38% e 4,31%, respectivamente.

Tabela 8. Resultados do ensaio de esclerometria para face 2
Índice esclerométrico (I.E.) – faces 2

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito		
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
1	A	A1	2011	Usados	64,41	2,59	65,50	1,13	64,20	2,20	
2		A1	2011	Usados	67,10	2,18	66,68	0,82	66,10	1,66	
3		A1	2016	Não usados	68,00	1,51	68,68	1,17	67,63	1,30	
4		A2	2015	Usados	63,40	1,90	64,94	1,33	64,78	1,48	
5		A2	2016	Usados	66,43	1,28	67,00	0,83	66,14	1,56	
6		B1	2011	Usados	63,38	2,62	61,31	1,64	61,13	2,80	
7		B2	2014	Usados	66,38	1,26	65,44	2,08	65,82	1,75	
9		B	B2	2019	Não usados	67,42	1,00	67,78	0,89	67,14	1,41
10			B2	2021	Não usados	63,83	2,55	65,23	2,58	64,92	3,42

Figura 111: Resultado do ensaio de esclerometria face 2

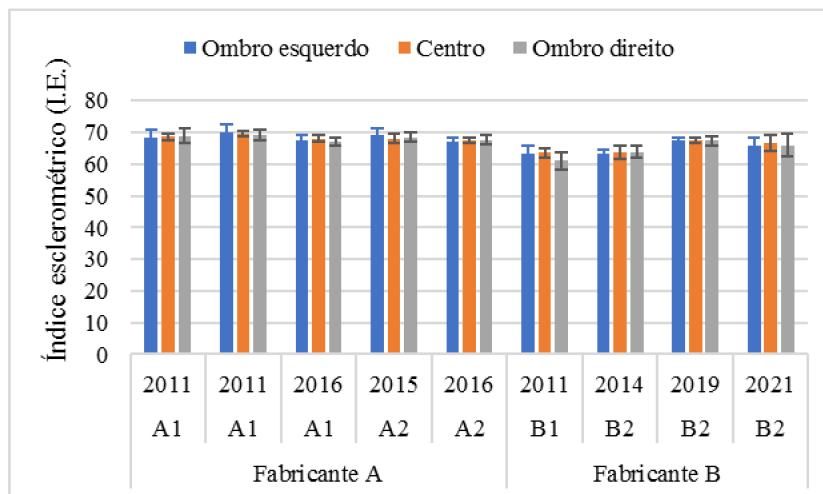


A tabela 9 e o gráfico da figura 112 apresentam os resultados do ensaio de esclerometria da faces 3. Observa-se que para o fabricante A, o grupo 2 apresenta maior valor de esclerometria e o grupo 5 o menor valor. O grupo 2 em relação aos grupos 1, 3, 4 e 5 apresenta valor maior em cerca de 1,53%, 3,06%, 1,58% e 3,48%, respectivamente. Para o fabricante B, o grupo 9 apresenta maior valor de esclerometria e o grupo 6 o menor valor. O grupo 9 em relação aos grupos 6, 7 e 10 apresenta valor maior em cerca de 7,70%, 5,91% e 2%, respectivamente.

Tabela 9. Resultados do ensaio de esclerometria para face 3
Índice esclerométrico (I.E.) – faces 3

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito		
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
1	A	A1	2011	Usados	68,30	1,06	68,60	1,36	68,90	2,28	
2		A1	2011	Usados	70,22	1,39	69,73	2,17	69,00	2,31	
3		A1	2016	Não usados	67,50	2,07	68,11	1,06	67,14	1,35	
4		A2	2015	Usados	69,20	2,15	68,08	1,86	68,44	1,24	
5		A2	2016	Usados	66,87	2,03	67,48	1,31	67,60	2,10	
6		B1	2011	Usados	63,29	1,11	63,53	1,72	61,00	1,41	
7		B2	2014	Usados	63,44	4,44	63,69	3,37	63,87	2,85	
9		B	B2	2019	Não usados	67,29	2,05	67,57	1,06	67,43	1,22
10			B2	2021	Não usados	65,83	2,21	66,50	1,76	66,00	3,03

Figura 112: Resultado do ensaio de esclerometria face 3



4.1.2 Ensaio de ultrassom

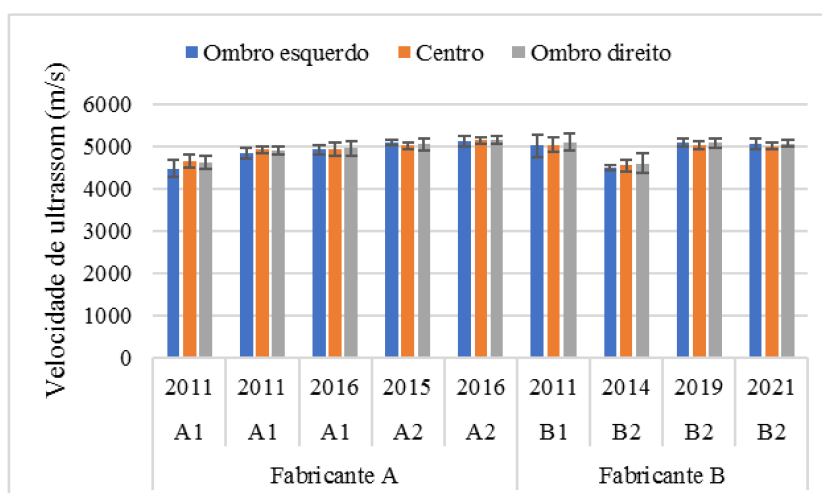
A tabela 10 e o gráfico da Figura 113 apresenta os resultados da medição da velocidade da onda ultrassônica pelo método direto nas faces 1 e 3. Neles é possível observar que em ambos fabricantes, os grupos apresentaram velocidades de onda ultrassônica superiores à 4000 m/s. Para o fabricante A, o grupo 5 apresenta o maior valor de velocidade de ultrassom e o grupo 1 o menor. O grupo 5 em relação aos grupos 1, 2, 3, e 4 apresenta maior valor em

cerca de 12,32%, 5,21%, 4,29% e 1,84%, respetivamente. Para o fabricante B, o grupo 9 apresenta maior valor de velocidade de ultrassom e o grupo 7 o menor. O grupo 9 em relação aos grupos 6, 7 e 10 apresenta maior valor em cerca de 0,35%, 11,35% e 0,50%, respetivamente.

Tabela 10. Resultados do ensaio de ultrassom para face 1-3

Velocidade de ultrassom (m/s) – faces 1-3											
Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito		
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
1	A	A1	2011	Usados	4483,00	197,88	4649,56	150,60	4629,67	164,46	
2		A1	2011	Usados	4838,78	120,50	4931,56	81,85	4922,00	91,02	
3		A1	2016	Não usados	4925,00	121,19	4933,63	163,39	4962,88	178,64	
4		A2	2015	Usados	5098,22	76,30	5024,33	78,61	5056,22	137,12	
5		A2	2016	Usados	5138,83	127,29	5157,75	78,39	5161,17	92,83	
6		B1	2011	Usados	5018,75	276,79	5045,62	176,56	5107,14	193,62	
7		B2	2014	Usados	4514,27	63,44	4559,87	138,20	4598,29	234,31	
9		B	B2	2019	Não usados	5095,64	98,85	5039,86	89,19	5088,58	110,31
10			B2	2021	Não usados	5057,00	119,00	5015,17	84,98	5075,42	78,59

Figura 113: Resultados do ensaio de ultrassom para as faces 1-3



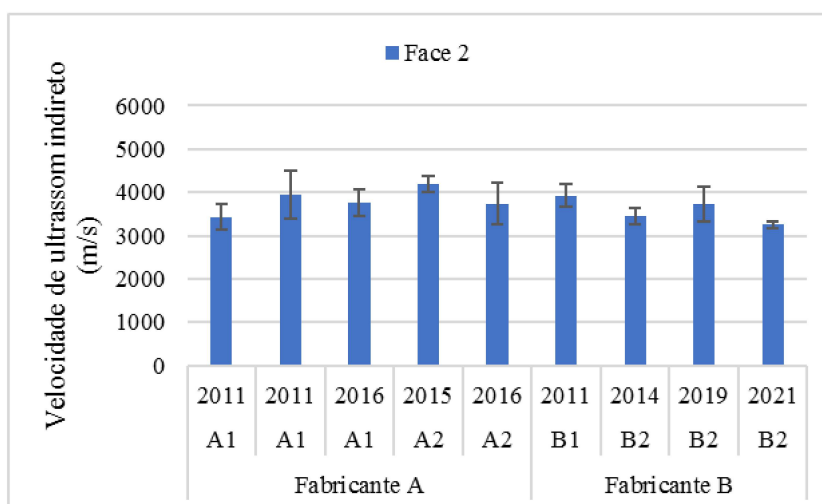
Os resultados da face 2 no modo indireto, estão apresentados na tabela 11 e no gráfico da figura 114. Observa-se que ambos fabricantes apresentam valores de velocidade de ultrassom superiores a 3000 m/s. Para o fabricante A, o grupo 4 apresenta maior valor de

velocidade de ultrassom e o grupo 1 o menor valor. O grupo 4 em relação aos grupos 1, 2, 3 e 5 apresenta maior valor em cerca de 22,02%, 5,91%, 10,91% e 11,84%, respectivamente. Para o fabricante B, o grupo 6 apresenta maior valor de velocidade de ultrassom e o grupo 10 o menor valor. O grupo 6 em relação aos grupos 7, 9, e 10 apresenta maior valor em cerca de 14,16%, 5,21% e 20,50%, respectivamente.

Tabela 11. Resultados do ensaio de ultrassom para face 2
Velocidade de ultrassom (m/s) – faces 2

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Face 2	
					Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	3426,66	288,40
2		A1	2011	Usados	3947,90	567,51
3		A1	2016	Não usados	3770,00	308,92
4		A2	2015	Usados	4181,11	181,00
5		A2	2016	Usados	3738,57	479,66
6	B	B1	2011	Usados	3925,71	250,59
7		B2	2014	Usados	3438,63	183,75
9		B2	2019	Não usados	3731,07	395,44
10		B2	2021	Não usados	3257,89	75,11

Figura 114: Resultados do ensaio de ultrassom para a face 2



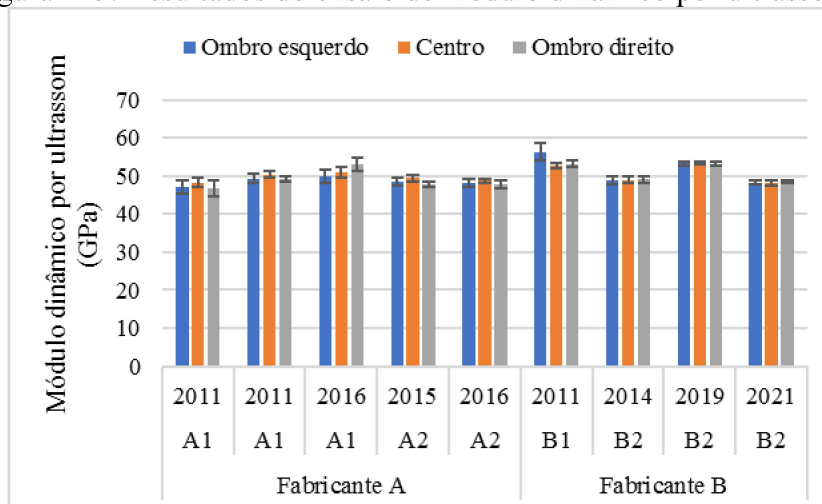
4.1.3 Ensaio de módulo dinâmico por ultrassom

Os resultados das medições do módulo dinâmico por ultrassom estão apresentados na tabela 12 e no gráfico da figura 115, para as regiões dos ombros (esquerdo e direito) e centro. Observa-se que de maneira geral todos os grupos apresentaram resultados de módulo dinâmico superiores à 40 GPa. Para o fabricante A, o grupo 3 apresentou maior valor de módulo dinâmico e o grupo 1 o menor valor. O grupo 3 em relação aos grupos 1, 2, 4 e 5, apresenta maior valor em cerca de 8,22%, 3,40%, 5,68% e 6,34%, respetivamente. Para o fabricante B, o grupo 6 apresenta maior valor e o grupo 10 o menor valor. O grupo 6 em relação aos grupos 7, 9 e 10, apresenta maior valor em cerca de 10,54%, 1,54% e 12,10%, respetivamente.

Tabela 12. Resultados do ensaio de módulo dinâmico por ultrassom nas faces 1-3

Módulo dinâmico por ultrassom (GPa) – faces 1-3										
Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	47,13	1,77	48,34	1,16	46,86	2,07
2		A1	2011	Usados	49,35	1,20	50,44	0,89	49,17	0,59
3		A1	2016	Não usados	50,04	1,72	50,85	1,42	53,12	1,75
4		A2	2015	Usados	48,52	0,97	49,44	0,80	47,77	0,60
5		A2	2016	Usados	48,23	1,06	48,76	0,58	47,84	1,05
6	B	B1	2011	Usados	56,39	2,25	52,73	0,78	53,25	0,91
7		B2	2014	Usados	48,77	1,03	48,98	0,92	49,12	0,83
9		B2	2019	Não usados	53,28	0,64	53,37	0,43	53,25	0,51
10		B2	2021	Não usados	48,21	0,50	48,12	0,67	48,52	0,44

Figura 115: Resultados do ensaio de módulo dinâmico por ultrassom



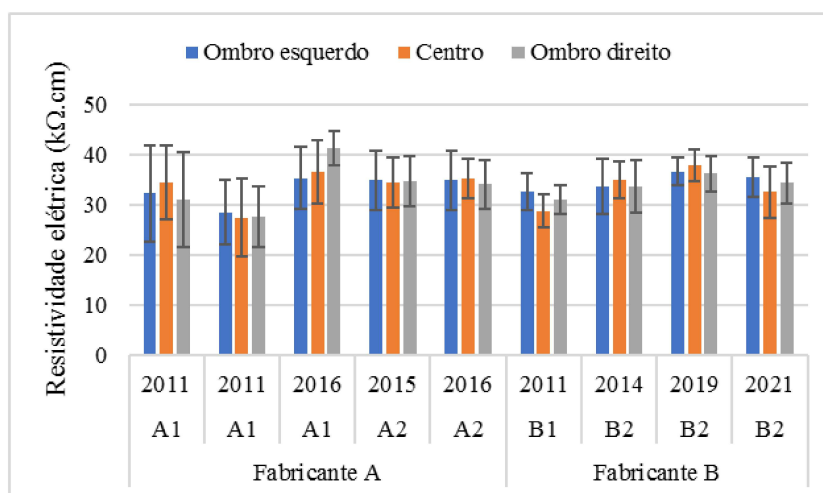
4.1.4 Ensaio de resistividade elétrica superficial

A tabela 13 e o gráfico da figura 116 apresentam os resultados de medição da resistividade elétrica superficial de cada grupo na face 1, para as regiões dos ombros (esquerdo e direito) e centro. Neles observa-se que todos os grupos apresentaram valores de resistividade elétrica superficial superiores a 20 kΩcm. Para o fabricante A, o grupo 3 apresentou maior valor e o grupo 2 o menor valor. O grupo 3 em relação aos grupos 1, 2, 4 e 5 apresentou valor maior em cerca de 15,79%, 35,61%, 8,71% e 8,71%, respetivamente. Para o fabricante B, o grupo 9 apresentou valor maior enquanto que o grupo 6 apresentou o menor. O grupo 9 em relação aos grupos 6, 7 e 10 apresentou valor maior em cerca de 19,95%, 8,25% e 8,15%.

Tabela 13. Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 1
Resistividade elétrica superficial (kΩcm) – faces 1

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	32,18	9,54	34,45	7,36	31,04	9,46
2		A1	2011	Usados	28,37	6,44	27,39	7,74	27,65	6,05
3		A1	2016	Não usados	35,30	6,25	36,53	6,37	41,26	3,40
4		A2	2015	Usados	34,87	5,91	34,44	5,07	34,72	4,94
5		A2	2016	Usados	34,80	5,79	35,20	3,95	34,03	4,90
6	B	B1	2011	Usados	32,57	3,79	28,72	3,28	30,91	2,92
7		B2	2014	Usados	33,58	5,56	34,95	3,60	33,63	5,21
9		B2	2019	Não usados	36,55	2,72	37,87	3,23	36,15	3,50
10		B2	2021	Não usados	35,45	3,99	32,49	5,11	34,29	4,11

Figura 116: Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para faces 1

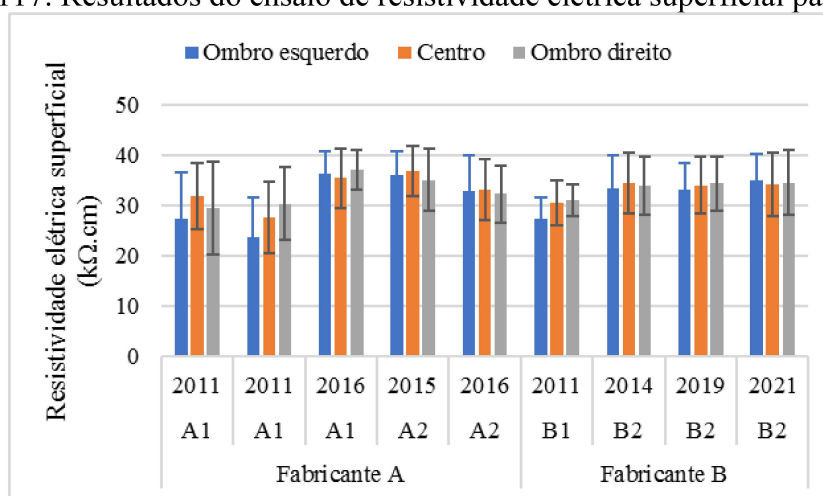


A tabela 14 e o gráfico da figura 117 apresentam os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 2. Observa-se que para o fabricante A, o grupo 3 apresenta maior valor de resistividade elétrica superficial e o grupo 2 o menor valor. O grupo 3 em relação aos grupos 1, 2, 4 e 5 apresenta valor maior em cerca de 22,83%, 33,32%, 0,84% e 10,70%, respetivamente. Para o fabricante B, o grupo 10 apresenta maior valor e o grupo 6 o menor valor. O grupo 10 em relação aos grupos 6, 7 e 9 apresenta valor maior em cerca de 16,71%, 1,77% e 2,16%, respetivamente.

Tabela 14. Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 2

Resistividade elétrica superficial (kΩcm) – faces 2										
Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	27,27	9,13	31,82	6,63	29,36	9,15
2		A1	2011	Usados	23,69	7,95	27,49	7,06	30,29	7,29
3		A1	2016	Não usados	36,26	4,57	35,37	5,93	37,00	3,88
4		A2	2015	Usados	35,91	4,92	36,77	4,98	35,06	6,08
5		A2	2016	Usados	32,89	6,95	33,07	6,04	32,17	5,61
6	B	B1	2011	Usados	27,18	4,33	30,47	4,42	31,03	3,11
7		B2	2014	Usados	33,46	6,40	34,37	6,00	33,88	5,75
9		B2	2019	Não usados	33,03	5,27	33,94	5,60	34,33	5,34
10		B2	2021	Não usados	34,85	5,25	34,14	6,20	34,51	6,46

Figura 117: Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para faces 2

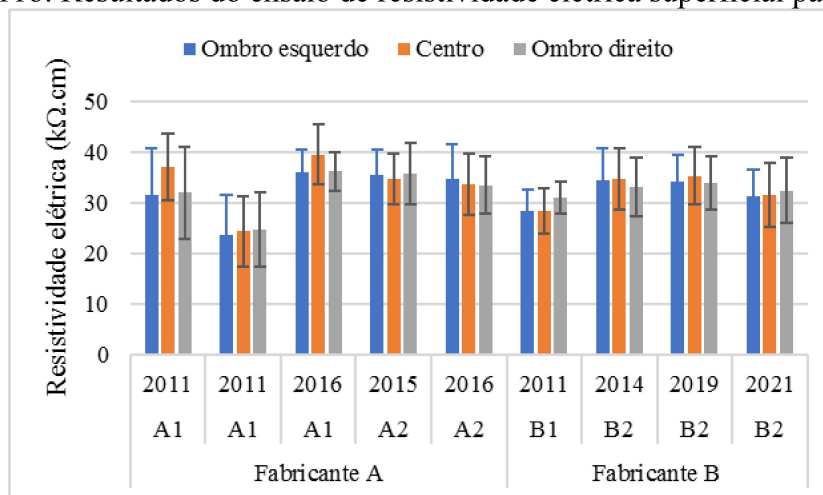


A tabela 15 e o gráfico da figura 118 apresentam os resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 3. Observa-se que para o fabricante A, o grupo 3 apresenta maior valor e o grupo 2 o menor valor. O grupo 3 em relação aos grupos 1, 2, 4 e 5 apresenta valor maior em cerca de 10,95%, 53,68%, 5,18% e 9,58%, respetivamente. Para o fabricante B, o grupo 9 apresenta maior valor e o grupo 6 o menor valor. O grupo 9 em relação aos grupos 6, 7 e 10 apresenta valor maior em cerca de 17,81%, 1,32% e 8,57%, respetivamente.

Tabela 15. Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para face 3

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Resistividade elétrica superficial (kΩcm) – faces 3					
					Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	31,57	6,50	37,07	6,55	31,92	8,66
2		A1	2011	Usados	23,62	10,66	24,32	8,27	24,67	9,68
3		A1	2016	Não usados	35,94	3,12	39,48	4,32	36,14	2,93
4		A2	2015	Usados	35,54	3,38	34,77	4,87	35,77	3,20
5		A2	2016	Usados	34,67	3,89	33,73	3,94	33,41	4,13
6	B	B1	2011	Usados	28,34	4,15	28,35	3,23	31,06	4,33
7		B2	2014	Usados	34,42	4,70	34,59	3,74	33,01	4,98
9		B2	2019	Não usados	34,22	4,95	35,30	4,59	33,85	4,31
10		B2	2021	Não usados	31,33	5,82	31,50	4,46	32,38	4,57

Figura 118: Resultados do ensaio de resistividade elétrica superficial para faces 3

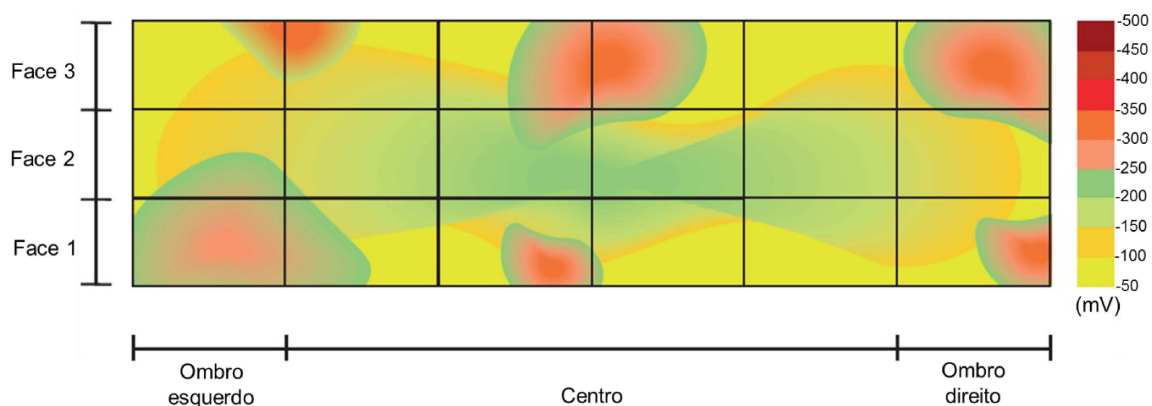


4.1.5 Ensaio de potencial de corrosão

Com os resultados obtidos das medições efetuadas, foi feita uma média de cada grupo e com ela foram produzidos gráficos de contorno que mostram o mapeamento do potencial de corrosão em toda área do dormente, ou seja, as faces 1, 2 e 3. Pelos gráficos observa-se que todos os grupos apresentaram valor de potencial de corrosão maior que -350 milivolts ($E > -350$ mV). Os gráficos de contorno estão apresentados nas figuras abaixo.

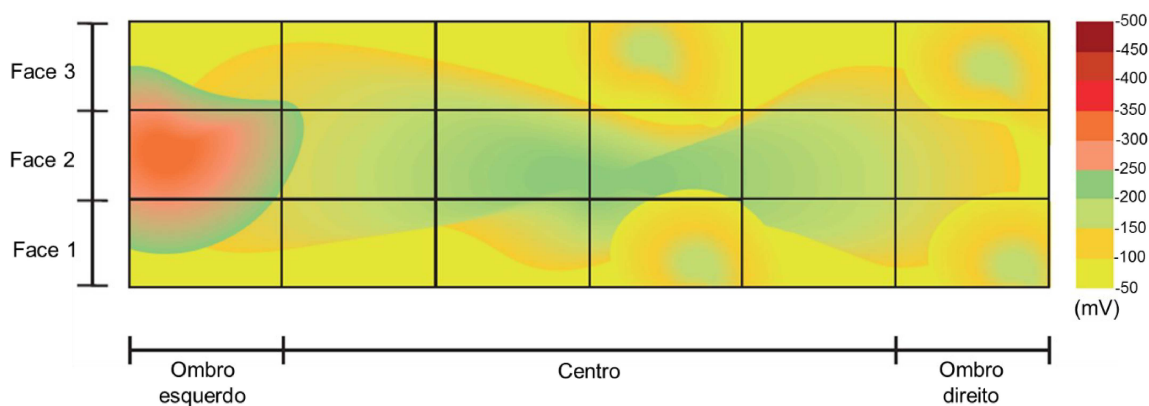
Para o grupo 1, os resultados estão apresentados na Figura 119. Neste grupo, observa-se um potencial eletronegativo ligeiro (até -250 mV) distribuído ao longo dos dormentes e um mais elevado na região dos ombros e centro onde os valores chegam até aos -350 mV.

Figura 119: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 1.



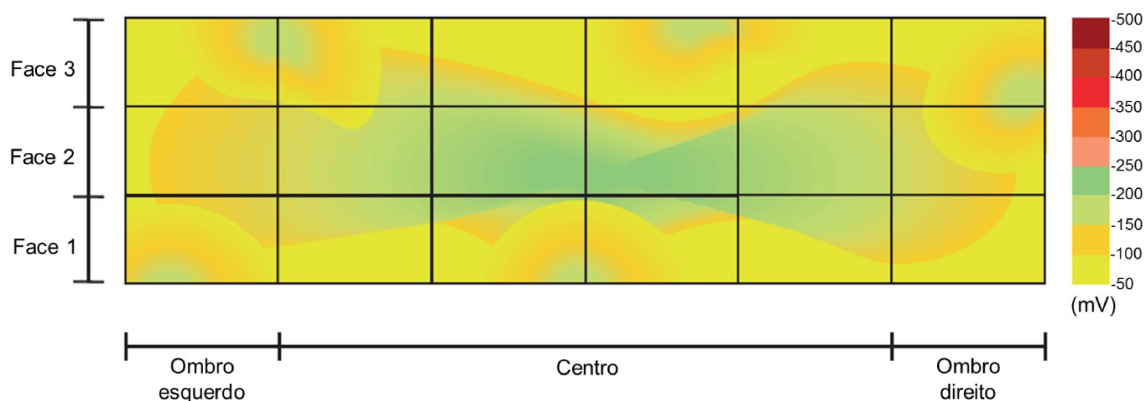
Para o grupo 2 o gráfico de contorno está apresentado na figura 120. Nele observa-se um potencial eletronegativo de até -200 mV distribuído ao longo dos dormentes e um mais elevado (até -350 mV) na região do ombro esquerdo.

Figura 120: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 2.



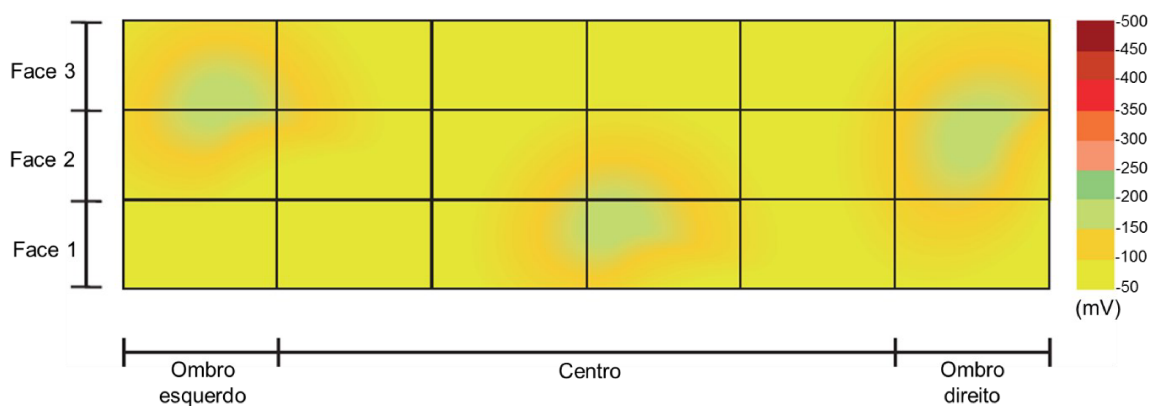
Para o grupo 3 o gráfico de contorno está apresentado na figura 121. Nele observa-se um potencial eletronegativo de até -250 mV distribuído ao longo dos dormentes.

Figura 121: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 3.



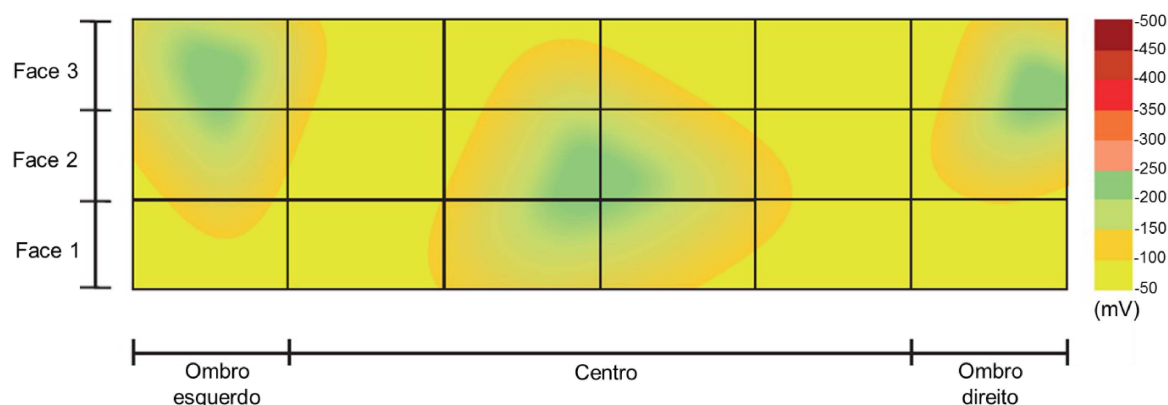
Para o grupo 4, os resultados estão apresentados na Figura 122. Neste grupo, observa-se um potencial eletronegativo de até -100 mV distribuído ao longo dos dormentes e uma ligeira acentuação na região dos ombros e centro onde os valores chegam até aos -200 mV.

Figura 122: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 4.



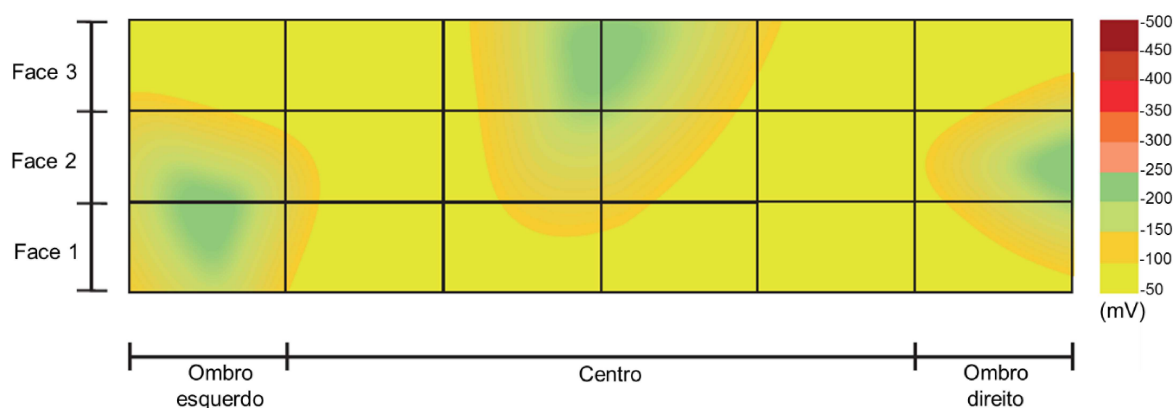
Para o grupo 5, os resultados estão apresentados na Figura 123. Neste grupo, observa-se também um potencial eletronegativo de até -100 mV distribuído ao longo dos dormentes e uma ligeira acentuação na região dos ombros e centro onde os valores chegam até aos -250 mV.

Figura 123: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 5.



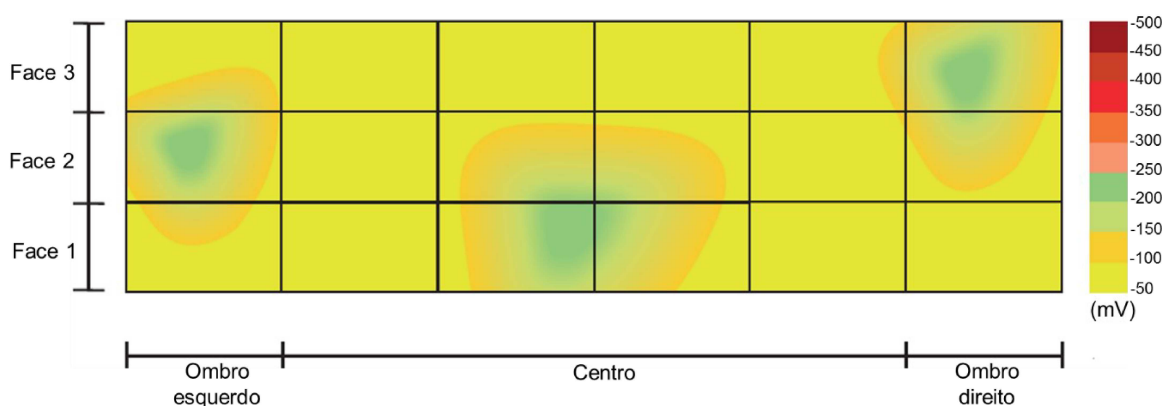
Para o grupo 6, os resultados estão apresentados na Figura 124 e se assemelham aos do grupo 5, ou seja, apresentam um potencial eletronegativo de até -100 mV distribuído ao longo dos dormentes e um de até -250 mV concentrado na região dos ombros e centro.

Figura 124: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 6.



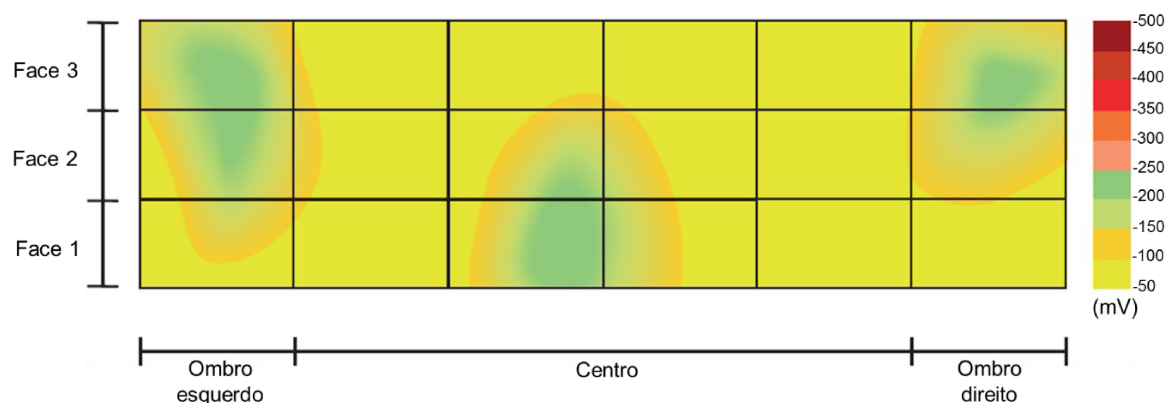
Para o grupo 7, os resultados estão apresentados na Figura 125 e se assemelham aos do grupo 6, ou seja, apresentam um potencial eletronegativo de até -100 mV distribuído ao longo dos dormentes e um de até -250 mV concentrado na região dos ombros e centro.

Figura 125: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 7.



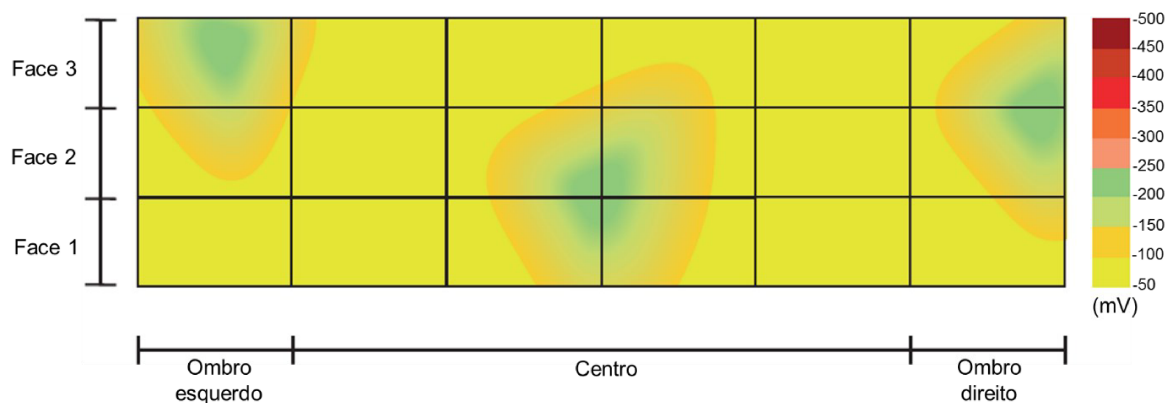
Para o grupo 9, os resultados estão apresentados na Figura 126 e se assemelham aos do grupo 7, ou seja, apresentam um potencial eletronegativo de até -100 mV distribuído ao longo dos dormentes e um de até -250 mV concentrado na região dos ombros e centro.

Figura 126: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 9.



Para o grupo 10, os resultados estão apresentados na Figura 127 e se assemelham aos do grupo 9, ou seja, apresentam um potencial eletronegativo de até -100 mV distribuído ao longo dos dormentes e um de até -250 mV concentrado na região dos ombros e centro.

Figura 127: Resultado do ensaio de potencial de corrosão para o grupo 10.



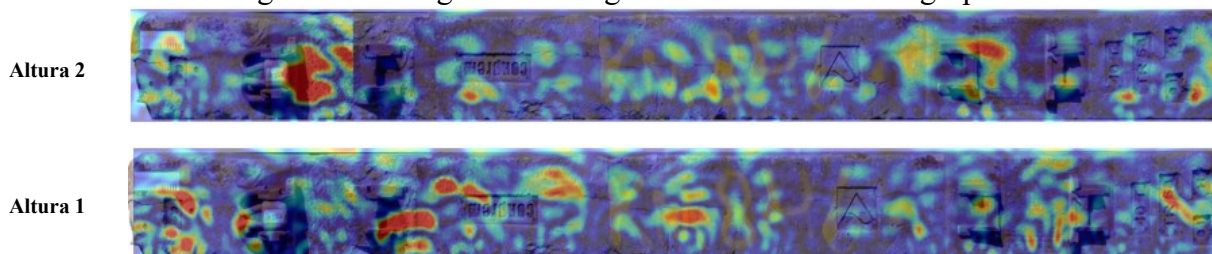
4.1.6 Ensaio de tomografia por ultrassom

As imagens geradas pelo ensaio de tomografia por ultrassom apresentam as descontinuidades e/ou vazios em cores amarela, verde e vermelha; para zonas contínuas a cor é azul. Sendo que o ensaio foi feito em duas alturas da face 1 de cada dormente, segue abaixo os resultados para cada grupo.

A Figura 128 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 1. Pelas imagens é possível observar que na leitura da altura 1 e 2, os dormentes apresentam descontinuidades ao

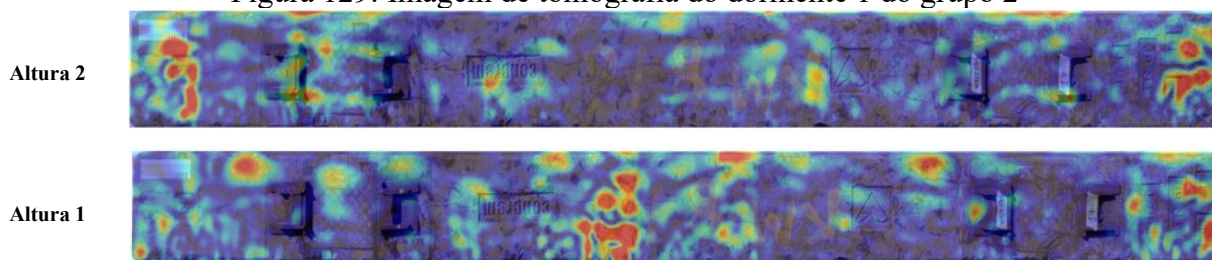
longo do dormente. Pela altura 1 as discontinuidades se apresentam ao longo de todo o dormente ao passo que pela altura 2 tendem a se concentrar na zona do acento dos trilhos.

Figura 128: Imagem de tomografia do dormente 3 do grupo 1



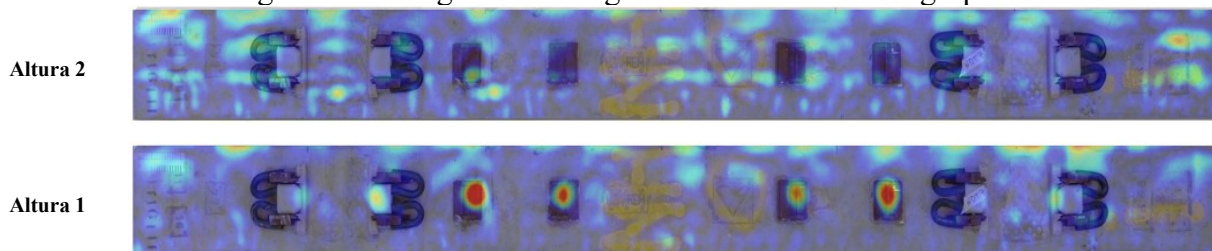
A Figura 129 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 2. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se que os dormentes apresentam discontinuidades em pontos específicos. Pela altura 1 as discontinuidades se apresentam na região central e no ombro direito ao passo que pela altura 2 se apresentam nas extremidades (ombro esquerdo e direito).

Figura 129: Imagem de tomografia do dormente 1 do grupo 2



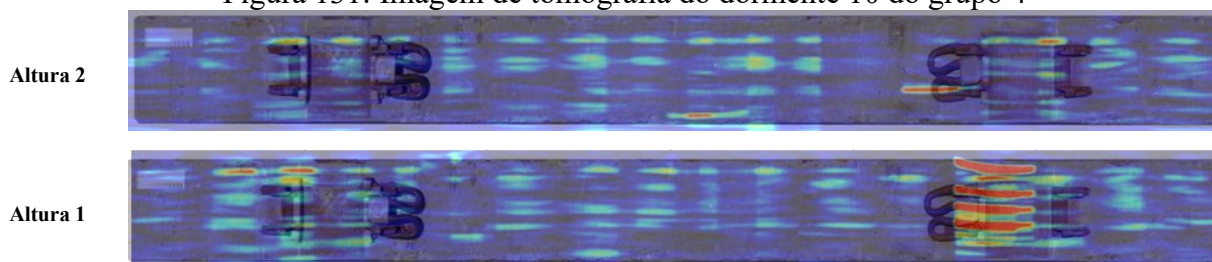
A Figura 130 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 3. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se que os dormentes não apresentam discontinuidades. Pela altura 1 observa-se possíveis discontinuidades na região central, mas nesses pontos tem-se os parafusos de fixação dos contratrilhos. Pela altura 2 não se apresentam quaisquer discontinuidades.

Figura 130: Imagem de tomografia do dormente 7 do grupo 3



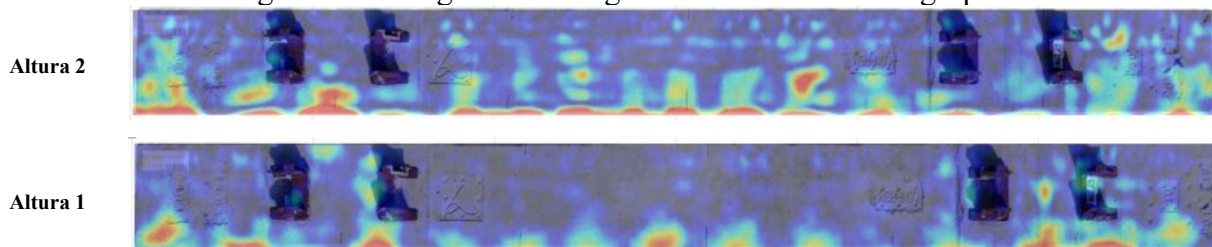
A Figura 131 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 4. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se que os dormentes apresentam descontinuidades nas regiões do assento dos trilhos. Pela altura 1 observa-se possíveis descontinuidades na região do acento dos trilhos; e pela altura 2 ligeiras descontinuidades na região do assento do trilho do lado direito.

Figura 131: Imagem de tomografia do dormente 10 do grupo 4



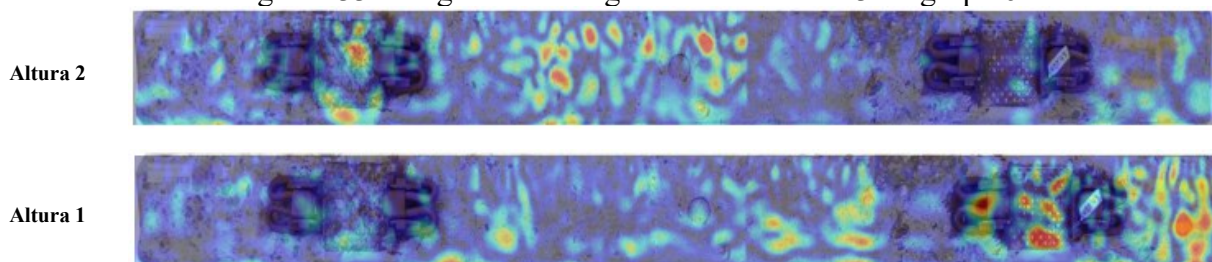
A Figura 132 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 5. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se que os dormentes apresentam descontinuidades ao longo de toda face 1 onde foi colocado o tomógrafo. Pela altura 1 também é possível observar possíveis descontinuidades na região do assento dos trilhos; e pela altura 2 as descontinuidades apresentam-se nas extremidades.

Figura 132: Imagem de tomografia do dormente 4 do grupo 5



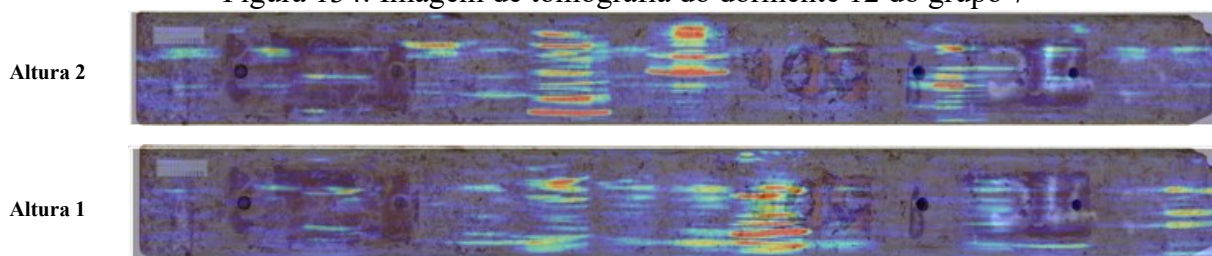
A Figura 133 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 6. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se que os dormentes apresentam descontinuidades na região do assento dos trilhos, centro e ombro direito. Pela altura 1 é possível observar a existência de descontinuidades na região central próxima dos trilhos, nos trilhos do lado direito e nos ombros; e pela altura 2 as descontinuidades apresentam-se na região central e no assento do trilho do lado esquerdo.

Figura 133: Imagem de tomografia do dormente 3 do grupo 6



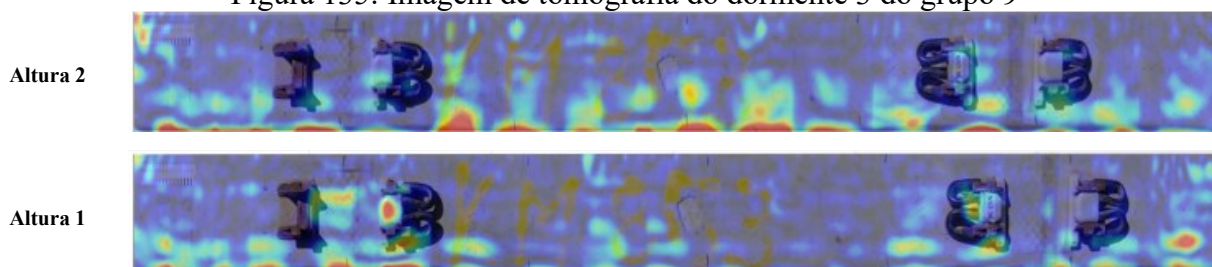
A Figura 134 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 7. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se que os dormentes apresentam descontinuidades na região central e próxima da região do assento do trilho do lado direito.

Figura 134: Imagem de tomografia do dormente 12 do grupo 7



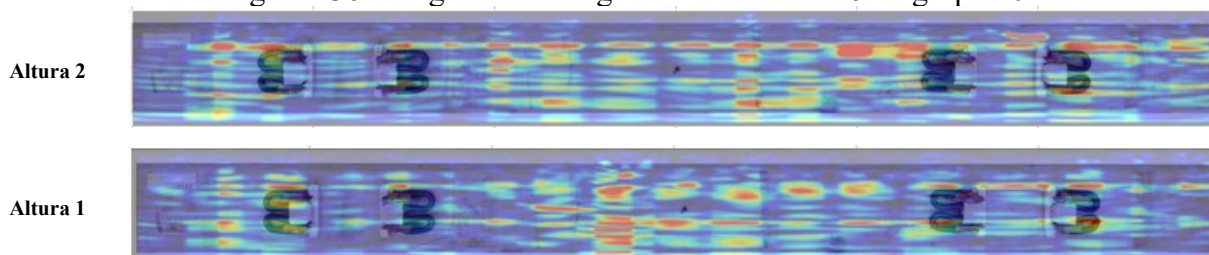
A Figura 135 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 9. Nas leituras da altura 1 e 2 observa-se um comportamento semelhante ao do grupo 5, ou seja, os dormentes apresentam descontinuidades ao longo de toda face 1 onde foi colocado o tomógrafo. Pela altura 1 também é possível observar possíveis descontinuidades na região do assento dos trilhos do lado esquerdo; e pela altura 2, descontinuidades ao longo da face 1 apenas.

Figura 135: Imagem de tomografia do dormente 3 do grupo 9



A Figura 136 apresenta as imagens de tomografia para o grupo 10. Pelas imagens é possível observar que na leitura da altura 1 e 2, os dormentes apresentam descontinuidades ao longo do dormente.

Figura 136: Imagem de tomografia do dormente 6 do grupo 10

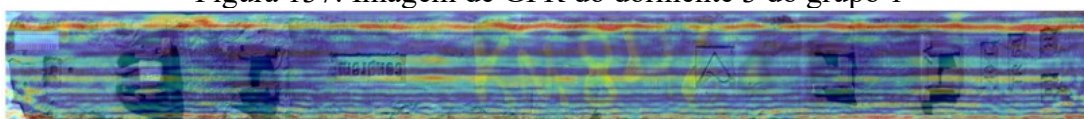


4.1.7 Ensaio de georradar (GPR)

O ensaio de Georadar ou GPR foi utilizado com o intuito de auxiliar a interpretação do resultado do ensaio de tomografia ultrassônica através da identificação de vazios ou descontinuidades no interior dos dormentes de cada grupo. A imagem gerada pelo GPR apresenta o concreto com a cor azul os demais materiais nas cores amarela, verde e vermelha, sendo a cor vermelha para aqueles materiais com propriedades eletromagnéticas diferentes da do concreto. O aço costuma aparecer na cor vermelha semelhantemente às descontinuidades quando muito intensa. Abaixo estão os resultados obtidos com o GPR para os mesmos dormentes apresentados no ensaio de tomografia e que representam a tendência geral dos dormentes de cada grupo.

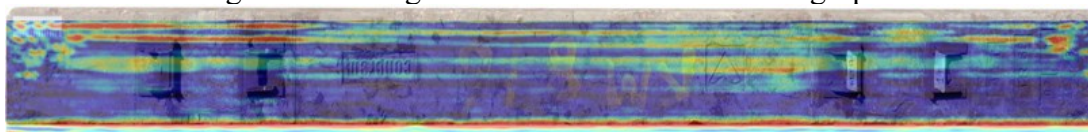
A Figura 137 apresenta a imagem de GPR para o grupo 1. Pela imagem observa-se que na região central do dormente há uma possível zona com ligeiras descontinuidades.

Figura 137: Imagem de GPR do dormente 3 do grupo 1



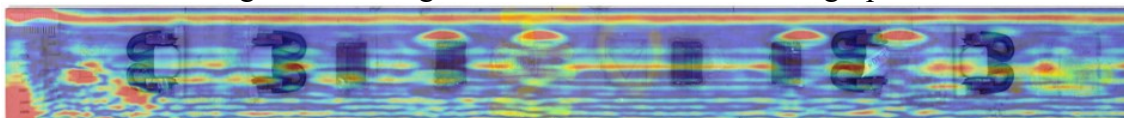
A Figura 138 apresenta a imagem de GPR para o grupo 2. Pela imagem observa-se possíveis descontinuidades nas extremidades e na região central próximo ao acento dos trilhos do lado direito.

Figura 138: Imagem de GPR do dormente 1 do grupo 2



A Figura 139 apresenta a imagem de GPR para o grupo 3. Pela imagem observa-se possíveis descontinuidades nas extremidades e na região central. Para esse grupo de dormentes, na região central encontram-se os parafusos de fixação dos contratrilhos.

Figura 139: Imagem de GPR do dormente 7 do grupo 3



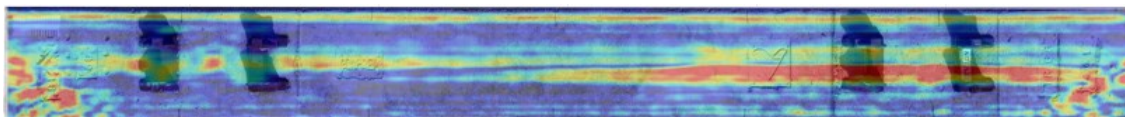
A Figura 140 apresenta a imagem de GPR para o grupo 4. A imagem gerada indica não haver descontinuidades ao longo do dormente.

Figura 140: Imagem de GPR do dormente 10 do grupo 4



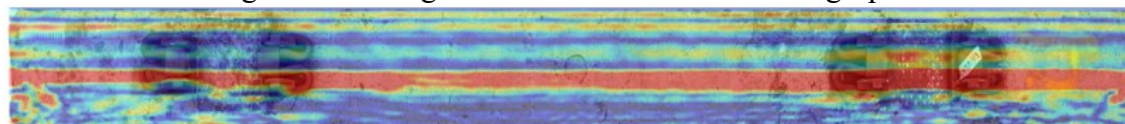
A Figura 141 apresenta a imagem de GPR para o grupo 5. A imagem gerada indica a existência de descontinuidade nas extremidades, zona do assento dos trilhos e no centro.

Figura 141: Imagem de GPR do dormente 4 do grupo 5



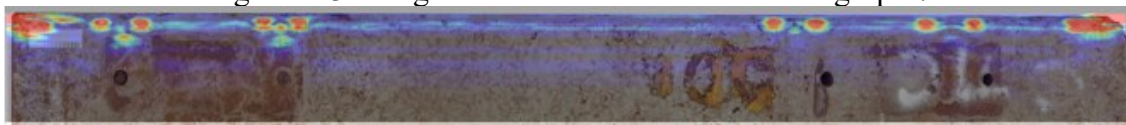
A Figura 142 apresenta a imagem de GPR para o grupo 6. A imagem gerada indica a existência de descontinuidade ao longo de todo dormente, com maior destaque para as extremidades, e zona do assento dos trilhos. Ainda na imagem, a extremidade direita apresenta descontinuidade mais acentuada em relação às demais.

Figura 142: Imagem de GPR do dormente 3 do grupo 6



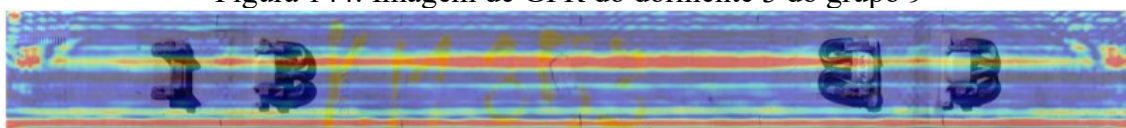
A Figura 143 apresenta a imagem de GPR para o grupo 7. A imagem gerada indica que de maneira geral não houve descontinuidade ao longo do dormente, com exceção à região das extremidades junto da face 3.

Figura 143: Imagem de GPR do dormente 12 do grupo 7



A Figura 144 apresenta a imagem de GPR para o grupo 9. A imagem gerada indica a existência de descontinuidade ao longo do eixo central longitudinal do dormente. Também é possível visualizar uma possível descontinuidade junto da face 1 onde foi colocado o equipamento para este ensaio.

Figura 144: Imagem de GPR do dormente 3 do grupo 9



A Figura 145 apresenta a imagem de GPR para o grupo 10. A imagem gerada indica não haver descontinuidades ao longo do dormente.

Figura 145: Imagem de GPR do dormente 6 do grupo 10.



4.2 RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICO

Abaixo segue os resultados do ensaio de resistência à compressão, ensaio de absorção por capilaridade e índice de vazios, realizados em testemunhos com diâmetro de 50 mm extraídos em dormentes de cada grupo.

4.2.1 Ensaio de resistência à compressão

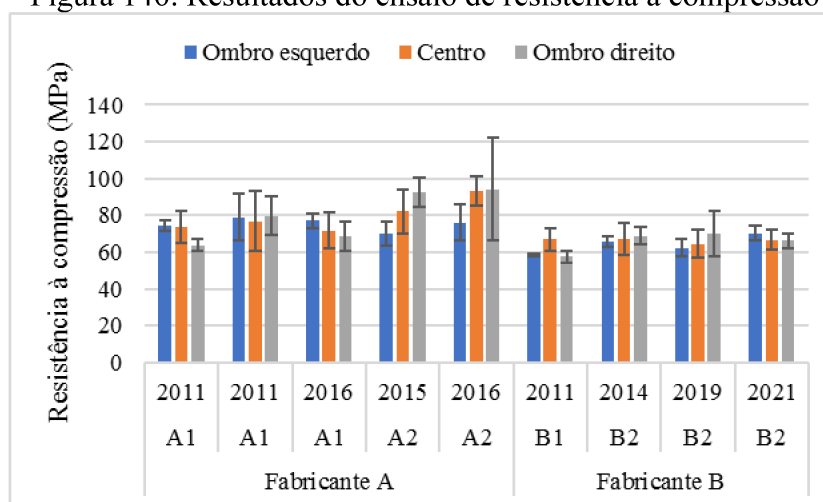
A Tabela 16 e a Figura 146 apresentam os resultados do ensaio de resistência à compressão de cada grupo, para as regiões dos ombros (esquerdo e direito) e centro. Os resultados mostram que todos os grupos tiveram valores de resistência à compressão superiores à 50 Mpa. Para o fabricante A, o grupo 5 apresenta maior valor e o grupo 1 o menor valor. O grupo 5 em relação aos grupos 1, 2, 3 e 4 apresentou valor mais alto em cerca de 24,32%, 11,98%, 21,16% e 7,64% respectivamente. Para o fabricante B, o grupo 10 apresenta maior valor

e o grupo 6 o menor valor. O grupo 10 em relação aos grupos 6, 7 e 9 apresentou valor mais alto em cerca de 10,93%, 0,74% e 3,31% respectivamente.

Tabela 16. Resultados do ensaio de resistência à compressão

Resistência à compressão (MPa)										
Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	74,44	3,13	73,70	8,68	63,94	3,42
2		A1	2011	Usados	79,09	12,73	76,71	16,24	79,65	10,46
3		A1	2016	Não usados	77,15	3,99	71,82	9,82	68,61	7,65
4		A2	2015	Usados	70,20	6,42	82,25	12,03	92,48	7,82
5		A2	2016	Usados	76,09	9,78	93,29	8,05	94,26	27,86
6	B	B1	2011	Usados	58,65	0,59	67,00	6,16	57,73	3,21
7		B2	2014	Usados	65,60	3,08	67,45	8,78	68,88	4,64
9		B2	2019	Não usados	62,33	4,68	64,47	7,70	70,11	12,12
10		B2	2021	Não usados	70,40	4,06	66,77	5,38	66,25	3,90

Figura 146: Resultados do ensaio de resistência à compressão



4.2.2 Índice de vazios

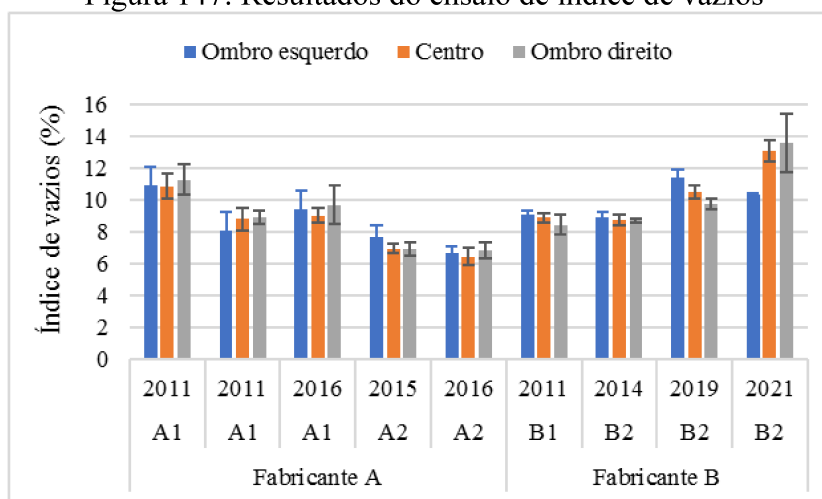
A tabela 17 e o gráfico da Figura 147 apresenta os resultados do ensaio de índice de vazios de cada grupo, para as regiões dos ombros (esquerdo e direito) e centro. Observa-se que para o fabricante A o grupo 1 apresentou maior valor de índice de vazios enquanto que os grupos 5 o menor. O grupo 1 em relação aos grupos 2, 3, 4 e 5 apresentou valor maior em cerca

de 28,21%, 17,65%, 53,63% e 65,66%, respetivamente. Já para o fabricante B, o grupo 10 apresentou maior valor e os grupos 6 e 7 o menor. O grupo 10 em relação aos grupos 6, 7 e 9 apresentou valor maior em cerca de 40,21%, 40,21% e 16,9%, respetivamente.

Tabela 17. Resultados do ensaio de índice de vazios

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Índice de vazios (%)					
					Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	10,91	1,16	10,85	0,80	11,24	0,95
2		A1	2011	Usados	8,07	1,13	8,79	0,71	8,88	0,39
3		A1	2016	Não usados	9,39	1,16	9,01	0,48	9,65	1,21
4		A2	2015	Usados	7,67	0,70	6,92	0,31	6,90	0,39
5		A2	2016	Usados	6,68	0,36	6,43	0,56	6,80	0,49
6	B	B1	2011	Usados	9,02	0,32	8,89	0,30	8,42	0,64
7		B2	2014	Usados	8,91	0,34	8,73	0,36	8,69	0,12
9		B2	2019	Não usados	11,37	0,51	10,49	0,44	9,73	0,31
10		B2	2021	Não usados	10,29	0,12	13,09	0,66	13,56	1,81

Figura 147: Resultados do ensaio de índice de vazios



4.2.3 Absorção por capilaridade

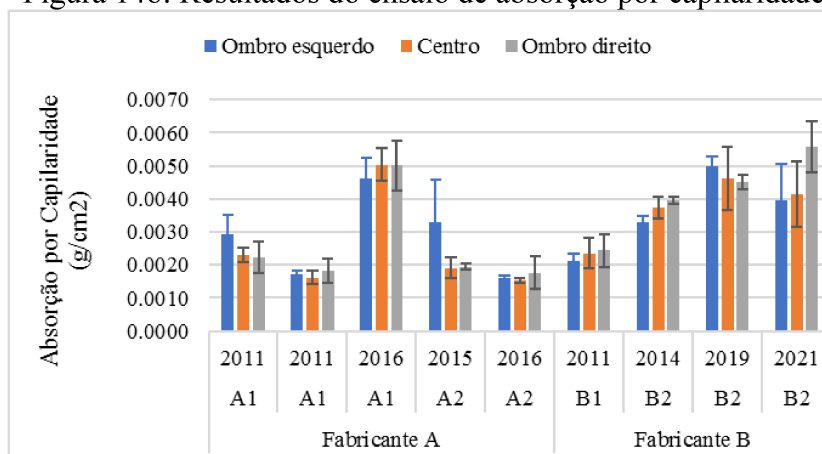
A tabela 18 e o gráfico da Figura 148 apresenta os resultados do ensaio de absorção por capilaridade de cada grupo, para as regiões dos ombros (esquerdo e direito) e centro. Observa-se que para o fabricante A, o grupo 3 apresentou maior valor absorção por capilaridade e o grupo 2 o menor. O grupo 3 em relação aos grupos 1, 2 4 e 5 apresentou valor maior em cerca de 67,88%, 142,94%, 93,90% e 142,94%, respetivamente. Para o fabricante B, o grupo 9

apresentou maior valor e o grupo 6 o menor. O grupo 9 em relação aos grupos 6, 7 e 10 apresentou valor maior em cerca de 94,35%, 30,32% e 0,90%, respetivamente.

Tabela 18. Resultados do ensaio de índice de absorção por capilaridade

					Absorção por capilaridade (g/cm ²)					
Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	Ombro esquerdo		Centro		Ombro direito	
					Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
1	A	A1	2011	Usados	0,0029	0,0006	0,0023	0,0002	0,0022	0,0005
2		A1	2011	Usados	0,0017	0,0001	0,0016	0,0002	0,0018	0,0004
3		A1	2016	Não usados	0,0043	0,0005	0,0037	0,0002	0,0044	0,0002
4		A2	2015	Usados	0,0026	0,0002	0,0019	0,0002	0,0019	0,0001
5		A2	2016	Usados	0,0016	0,0001	0,0015	0,0001	0,0020	0,0004
6	B	B1	2011	Usados	0,0021	0,0002	0,0024	0,0005	0,0024	0,0005
7		B2	2014	Usados	0,0033	0,0002	0,0035	0,0001	0,0035	0,0001
9		B2	2019	Não usados	0,0043	0,0003	0,0046	0,0010	0,0045	0,0002
10		B2	2021	Não usados	0,0036	0,0005	0,0041	0,0010	0,0056	0,0008

Figura 148: Resultados do ensaio de absorção por capilaridade



5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios apresentados no capítulo anterior. Em seguida, procurou-se estabelecer correlações entre os ensaios não destrutivos e destrutivos.

Para os resultados dos ensaios de esclerometria e resistividade elétrica superficial, foi feita uma análise da variação dos resultados de cada grupo ao longo de cada face (direção longitudinal) e de cada região (direção transversal) conforme Figura 149 e 150, respectivamente. Para os demais, a análise foi realizada apenas na direção longitudinal. A análise consistiu em verificar se existe diferença nos resultados medidos ao longo de cada face entre as regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito.

Figura 149. Direção longitudinal para análise dos resultados

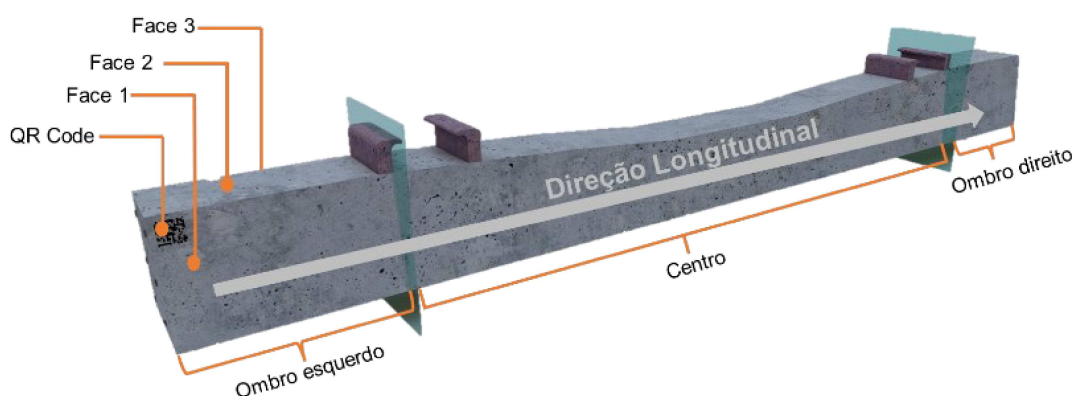
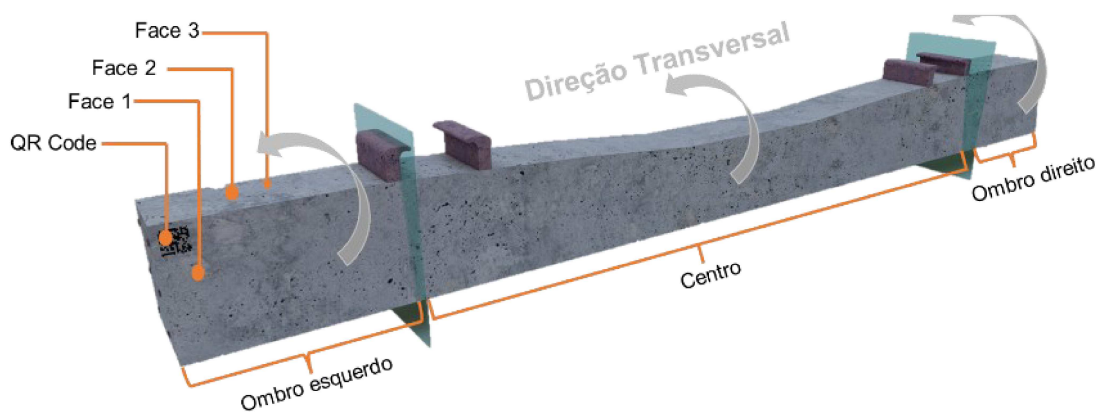


Figura 150. Direção transversal para análise dos resultados



5.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

5.1.1 Ensaio de esclerometria

Para os resultados apresentados nas tabelas 7, 8 e 9 foram realizadas análises estatísticas para verificação da variação dos resultados ao longo de cada face e de cada região. Assim, após se verificar os pressupostos de normalidade e igualdade de variâncias, foi testada a hipótese de igualdade entre as médias dentro de cada grupo por meio da ANOVA. Se rejeitada a hipótese de igualdade entre as médias o teste de *Tukey* foi usado para verificar qual media difere das demais. Desta forma, as tabelas 19 e 20 apresentam valor de *p* do teste da ANOVA ao longo de cada face e de cada região, respetivamente.

Tabela 19. Resultados do teste ANOVA para direção longitudinal

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor <i>p</i>)		
					Face 1	Face 2	Face 3
1	A	A1	2011	Usados	0,2037	0,3331	0,7214
2		A1	2011	Usados	0,6389	0,4101	0,4248
3		A1	2016	Não usados	0,1261	0,2931	0,5256
4		A2	2015	Usados	0,8241	0,0866	0,3808
5		A2	2016	Usados	0,6258	0,2008	0,5142
6	B	B1	2011	Usados	0,1180	0,2884	0,1003
7		B2	2014	Usados	0,3559	0,3151	0,9468
9		B2	2019	Não usados	0,3049	0,3134	0,8826
10		B2	2021	Não usados	0,6041	0,3541	0,7888

Tabela 20. Resultados do teste ANOVA para direção transversal

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor <i>p</i>)		
					Ombro esq	Centro	Ombro dir
1	A	A1	2011	Usados	2,43E-05	5,31E-06	5,03E-04
2		A1	2011	Usados	0,0013	1,9E-5	3,02E-04
3		A1	2016	Não usados	0,4862	0,3284	0,2907
4		A2	2015	Usados	0,0001	0,0003	1,39E-06
5		A2	2016	Usados	0,0102	0,1882	0,0275
6	B	B1	2011	Usados	0,5650	0,0223	0,3507
7		B2	2014	Usados	0,0271	0,1660	0,0102
9		B2	2019	Não usados	0,9717	0,0082	0,2716
10		B2	2021	Não usados	0,0004	0,1974	0,1502

Com base nos resultados da tabela 19 pode-se afirmar que não houve diferença significativa entre os resultados ao longo de cada face para as regiões (ombros e centro) dos dormentes dentro de cada grupo de ambos fabricantes. Pois, tem-se o valor $p > 0,05$, logo a hipótese nula (H_0) foi aceita. Isto indica a existência de uniformidade da camada superficial do concreto dos dormentes de cada grupo ao longo de cada face (NORHASRI et al., 2021).

Os resultados da tabela 20, indicam a existência de diferenças significativas entre os resultados ao longo de cada região (ombro esquerdo, centro e ombro direito) nas faces 1, 2 e 3 dos dormentes de cada grupo de ambos fabricantes, ou seja, na maioria dos casos tem-se o valor $p < 0,05$. Logo, rejeita-se H_0 e é aceita a hipótese alternativa H_1 . Assim, para estes casos foi utilizado o teste de *Tukey* com 95% de significância para verificação de qual região difere das demais e os resultados dessa análise estatística estão apresentados no Apêndice A1, onde se observa que nos casos em que não existe diferença (H_0 é aceita) pelo teste ANOVA foi utilizada a observação NA (não se aplica). Os resultados mostraram também que apenas os resultados da face 02 difere das demais. De acordo com You e Kaewunruen (2019), a forma como os dormentes são acomodados na ferrovia permite que sua face superior fique exposta às condições climáticas ao passo que as faces laterais ficam envolvidas na camada do lastro, o que pode de certo modo originar variação da uniformidade da camada superficial dos dormentes. Sendo assim, para análise dos resultados entre os grupos de cada fabricante, considerou-se apenas os resultados do ombro esquerdo e do centro para as faces 01 e face 02. Os resultados da análise estatística estão apresentados no Apêndice A2 e A3 para face 01 e apêndice A4 e A5 para face 02.

Considerando a face 01 e a região dos ombros, observa-se que para o fabricante A apenas o grupo 2 difere significativamente do grupo 3, ou seja, têm-se $G_2 \neq G_3$. O grupo 2 faz parte do grupo de dormente que foi utilizado na ferrovia ao passo que o grupo 3 não foi utilizado. O grupo 2 apresenta maior valor de índice esclerométrico em relação ao grupo 3, o que pode estar relacionado à idade do concreto desses dormentes, pois a idade do concreto tem influência nos resultados de esclerometria (MEMON et al., 2018). A cidade de fabricação que pode estar relacionada ao fornecimento da matéria prima, como por exemplo agregados, não teve influência nos resultados, uma vez que o grupo 2 e 3 foram produzidos na mesma cidade. Para o fabricante B, observa-se que os grupos 6 e 7 diferem dos grupos 9 e 10, ou seja, têm-se $G_6 \neq G_9$, $G_6 \neq G_{10}$, $G_7 \neq G_9$ e $G_7 \neq G_{10}$. Isto pode estar relacionado fundamentalmente com a condição do dormente, pois para os grupos 6 e 7 foram usados enquanto os grupos 9 e 10 não foram usados. Os grupos 9 e 10 apresentaram maiores valores comparados aos grupos 6 e 7.

Isto pode indicar que a idade não teve influência nos resultados. A cidade de fabricação pode ter certa influência pelo fato de que o grupo 6 apresentar valores mais baixos de esclerometria.

Considerando a região do centro para a face 01 observa-se que para o fabricante A, o grupo 2 difere dos demais com exceção do grupo 1. Neste caso têm-se $G2 \neq G3$, $G2 \neq G4$ e $G2 \neq G5$. Nessas condições, a idade do concreto pode ter certa influência, uma vez que o grupo 2 apresenta idade superior em relação aos grupos 3, 4 e 5. A condição de uso não teve muita influência sendo que o grupo 4 também foi usado na ferrovia. Por outra, a cidade de fabricação também não teve influência pois os grupos 2 e 3 foram produzidos na mesma cidade. Para o fabricante B o comportamento é semelhante ao dos ombros, ou seja, os grupos 6 e 7 diferem dos grupos 9 e 10 conforme visto anteriormente.

Para a face 02, região dos ombros e centro de ambos fabricantes, os resultados apresentados no apêndice A4 e A5, mostraram que não foi possível observar a influência das variáveis de estudo desta pesquisa, devido ao fato de que grupos com mesma condição de uso, idade e cidade de fabricação, apresentarem diferenças significativas entre si. Ou seja, para a região do ombro o fabricante A apresenta $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$, $G2 \neq G4$, $G3 \neq G4$ e $G4 \neq G5$; e o fabricante B apresenta $G6 \neq G7$, $G6 \neq G9$, $G7 \neq G10$ e $G9 \neq G10$. Para a região do centro o fabricante A apresenta $G1 \neq G3$, $G1 \neq G5$, $G2 \neq G3$, $G2 \neq G4$, $G3 \neq G4$, $G3 \neq G5$ e $G4 \neq G5$; e fabricante B apresenta $G6 \neq G9$, $G7 \neq G9$, $G9 \neq G10$, $G6 \neq G7$, $G6 \neq G10$ e $G7 \neq G10$. Isto pode ocorrer devido ao fato de que a face superior do dormente é diferente das outras devido à moldagem e os acessórios do sistema de fixação dos trilhos ferroviários. Por outro lado, possui área disponível para realização do teste inferior comparando com as superfícies laterais. Isto faz com que seja difícil manter uma distância mínima de 40 mm entre a borda e o ponto de impacto (JOKŊBAITIS et al., 2016; SHAKERI et al., 2022). Estas peculiaridades, podem originar variações nos valores medidos de índice de esclerometria por se tratar de um ensaio cujo resultado é influenciado pelas condições da superfície.

Para a região do ombro e centro, os resultados de ambos os fabricantes mostraram relação com os resultados do ensaio de resistência à compressão conforme as figuras 151, 152, 153 e 154. Os resultados da região dos ombros mostram que a resistência a compressão aumenta com o aumento do valor do índice esclerométrico, enquanto para a região do centro a relação não foi diretamente proporcional.

Figura 151: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo

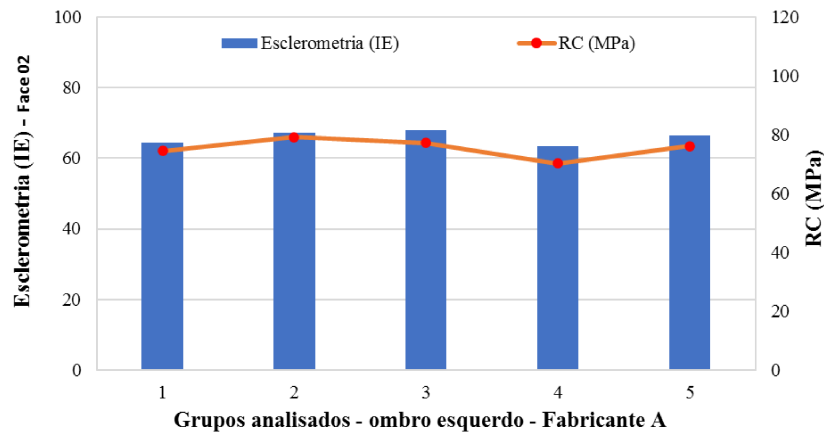


Figura 152: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo

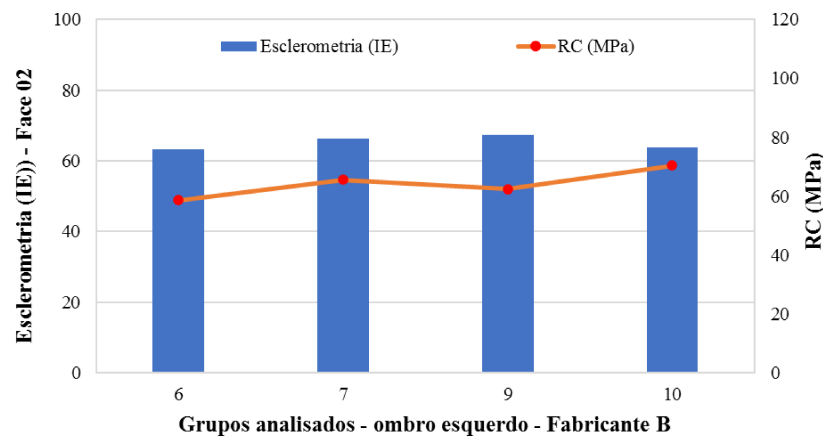


Figura 153: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante A – centro

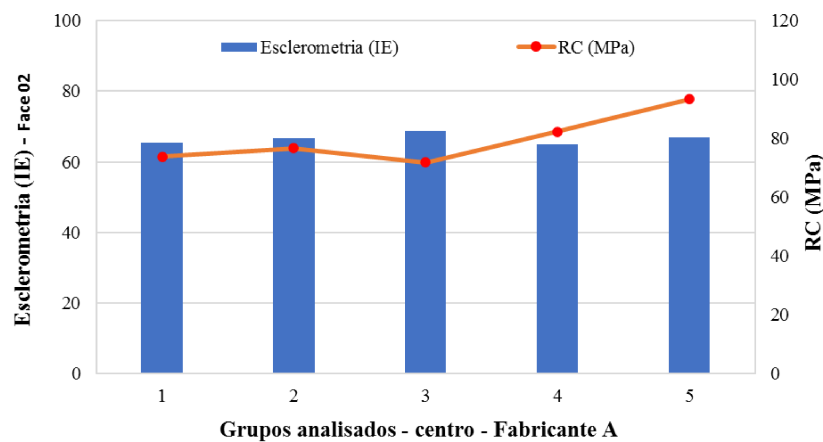
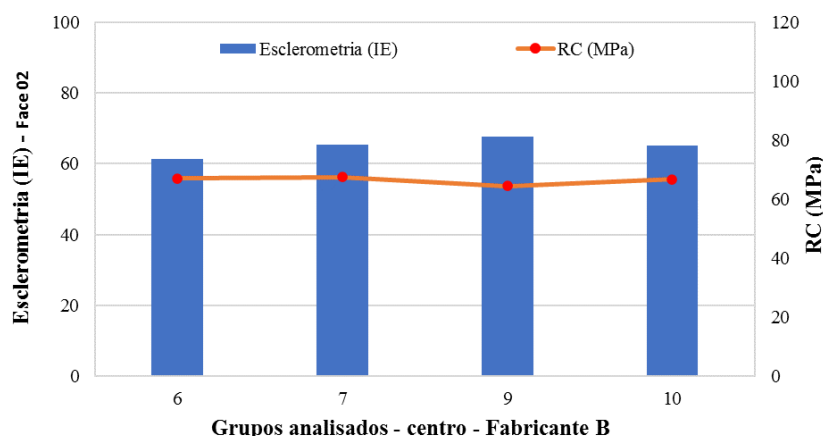


Figura 154: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante B – centro



5.1.2 Ensaio de ultrassom

Nos resultados apresentados na tabela 10 e figura 113, foram realizadas análises da variação dos resultados ao longo das faces 1-3 (ensaio no modo direto) entre as regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito, dentro de cada grupo de dormente de ambos os fabricantes. Assim, após a verificação de todos pressupostos estatísticos, foi realizado o teste de ANOVA cujos valores de p encontram-se na tabela 21, e fazem referência aos modos de leitura direto. Os resultados indicam que não houve diferença significativa entre os resultados da velocidade de ultrassom entre as regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito ao longo das faces 1-3, pois tem-se o valor $p > 0,05$, logo a hipótese nula H_0 foi aceite. Assim para análise dos resultados entre os grupos de cada fabricante, considerou-se apenas os resultados do ombro esquerdo e do centro. Os resultados estão apresentados no Apêndice A6 e A7 para face 01 (modo direto) e apêndice A8 para face 02 (modo indireto).

Tabela 21. Resultados do teste ANOVA para o modo direto (face 1-3)

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor ρ)
					Face 1-3
1	A	A1	2011	Usados	0.09018
2		A1	2011	Usados	0.10428
3		A1	2016	Não usados	0.87924
4		A2	2015	Usados	0.31753
5		A2	2016	Usados	0.84836
6	B	B1	2011	Usados	0.73738
7		B2	2014	Usados	0.37076
9		B2	2019	Não usados	0.28354
10		B2	2021	Não usados	0.29942

Considerando a face 1-3 (modo direto) e a região dos ombros, observa-se que para o fabricante A, tem-se $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$, $G1 \neq G4$, $G1 \neq G5$, $G2 \neq G4$, $G2 \neq G5$ e $G3 \neq G5$. Nesse caso, foi visível que a condição de utilização não teve influência nos resultados pois os resultados dos grupos de dormentes usados e não usado diferem entre si. A idade em termos de tempo de exposição na ferrovia, pode ter certa influência uma vez que os grupos com maior idade apresentam valores de velocidade de ultrassom mais baixos. Já a cidade de fabricação pode ter influência nos resultados, pois os dormentes produzidos na cidade A2 apresentaram maiores valores de ultrassom comparados aos produzidos na cidade A1. Isto pode estar relacionado com o tipo de agregado utilizado, uma vez que ele exerce muita influência nos resultados de ultrassom (ISAIAS et al., 2011; MOHAMMED; MAHMOOD, 2016). Considerando a mesma região, para o fabricante B tem-se que $G6 \neq G7$, $G7 \neq G9$ e $G7 \neq G10$. Os resultados mostram que a condição dos grupos de dormentes pode ter influência, pois grupos de dormentes não usado tiveram valores mais altos em comparação com aqueles que foram usados. A idade em termos de exposição na ferrovia não teve muita influência pois os grupos de dormentes com idades mais elevadas não apresentaram diferenças significativas em comparação com aqueles com idades menores ou data de fabricação mais recente. A cidade de fabricação não teve influência, pois até mesmo grupos de dormentes do mesmo fabricante apresentaram diferenças significativas entre si.

Os resultados obtidos da análise estatística da face 01 para a região do centro para ambos fabricantes, é semelhante aos da região do ombro apresentados anteriormente. Portanto, para este ensaio, o comportamento da região do centro não diferiu da região central.

Para a face 02 (modo indireto), cuja análise estatística está apresentada no apêndice A8, observa-se que para o fabricante A o grupo 1 difere do grupo 4, ou seja, tem-se $G1 \neq G4$. O grupo 1 apresentou menor valor de velocidade da onda ultrassônica ao passo que o grupo 4 o maior. Para o fabricante A, as variáveis de estudo não tiveram influência nos resultados. Já para o fabricante B tem-se o seguinte: $G6 \neq G7$, $G6 \neq G10$, $G7 \neq G9$ e $G9 \neq G10$. Os resultados mostram que a condição dos grupos de dormentes não teve influência uma vez que grupos de dormentes com a mesma condição diferem entre si e vice-versa. A idade em termos de exposição na ferrovia também não teve influência pois os grupos de dormentes com idades mais elevadas apresentaram maiores valores em comparação com aqueles com idades menores ou data de fabricação mais recente. A cidade de fabricação também não teve influência, pois até mesmo grupos de dormentes do mesmo fabricante apresentaram diferenças significativas entre si.

Foi analisada a relação entre o ensaio de ultrassom com os ensaios de resistência a compressão e índice de vazios. Os gráficos das figuras 155 à 158, mostram que o ensaio de ultrassom não apresenta uma relação direta com a resistência à compressão para ambos fabricantes. De acordo com Hussein e Abdi (2021), embora o ensaio de ultrassom seja utilizado para avaliação do concreto, não existe uma relação direta com a resistência a compressão. Ele é influenciado pela densidade do concreto, e quando estes apresentam velocidades de onda entre 3500 ms à 4500 m/s são considerados de boa qualidade enquanto os que apresentam valores superiores à 4500 m/s são de qualidade excelente.

Figura 155: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo

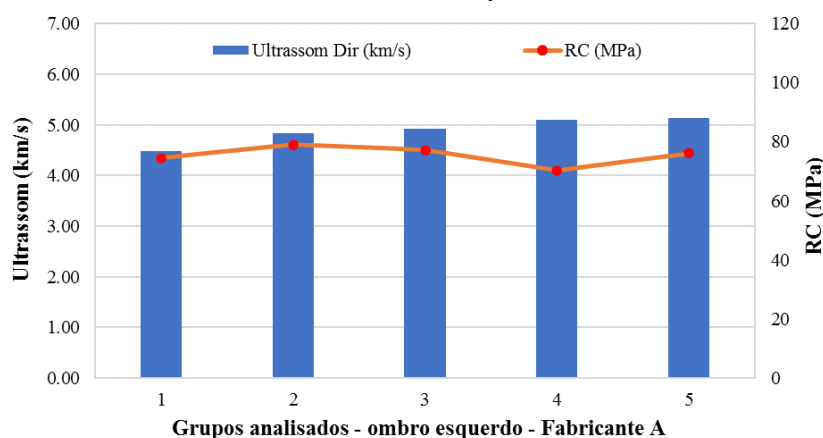


Figura 156: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo

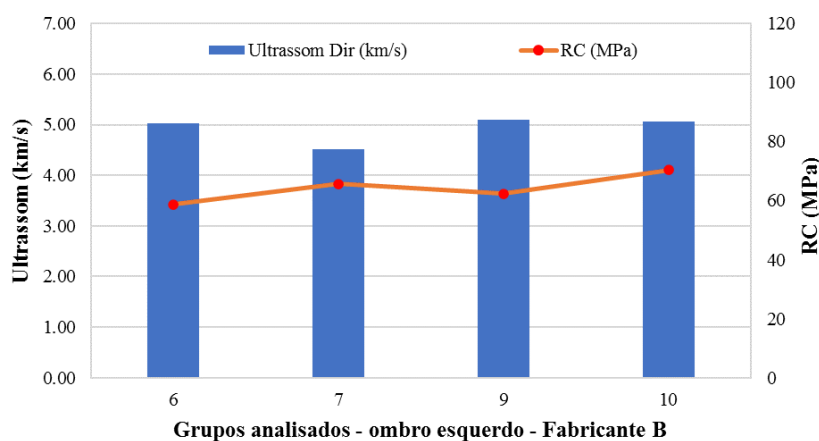


Figura 157: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante A – centro

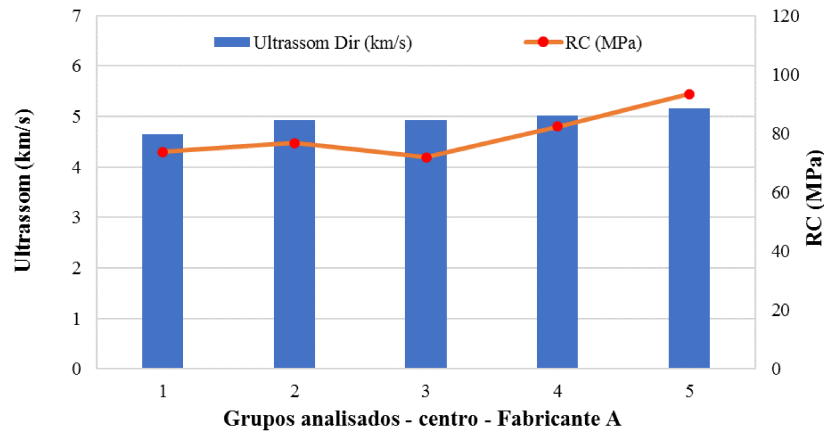
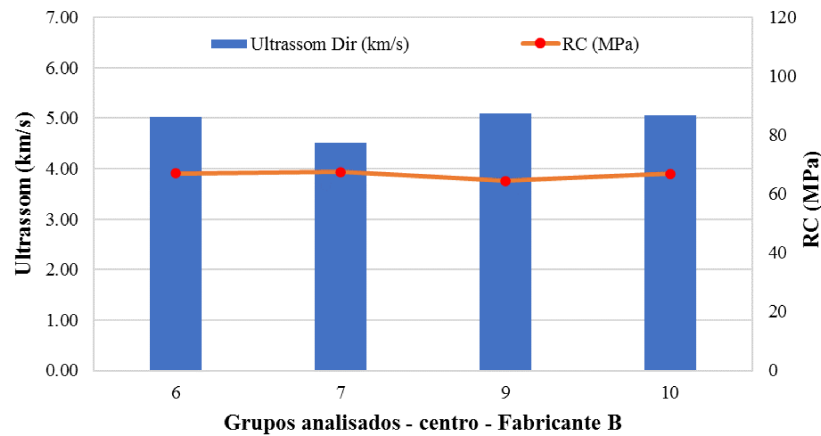


Figura 158: Ensaio de ultrassom e resistência à compressão – Fabricante B – centro



Os gráficos das figuras 159 à 162, mostram que também não houve relação direta entre o ensaio de ultrassom e o índice de vazios, para ambos fabricantes.

Figura 159: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante A – ombro esquerdo

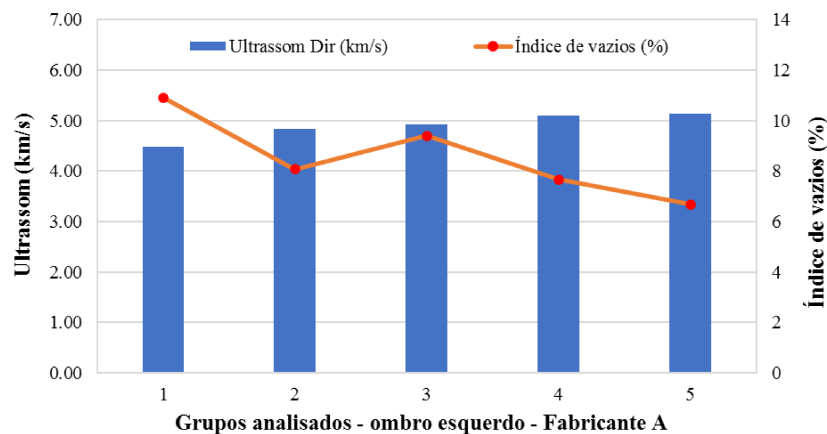


Figura 160: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante B – ombro esquerdo

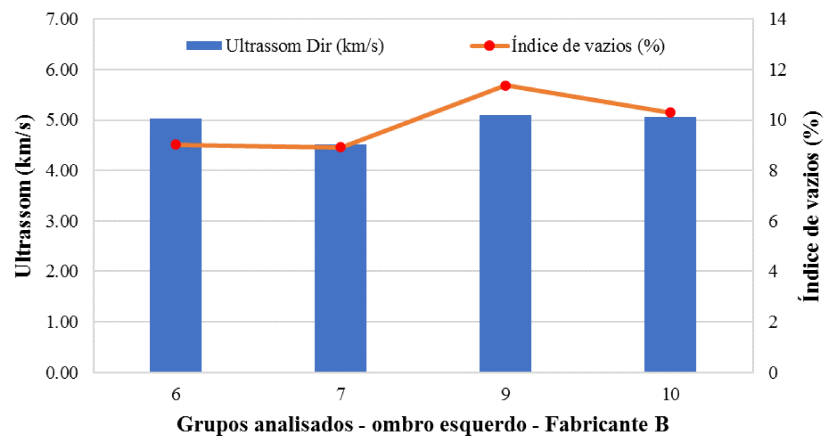


Figura 161: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante A – centro

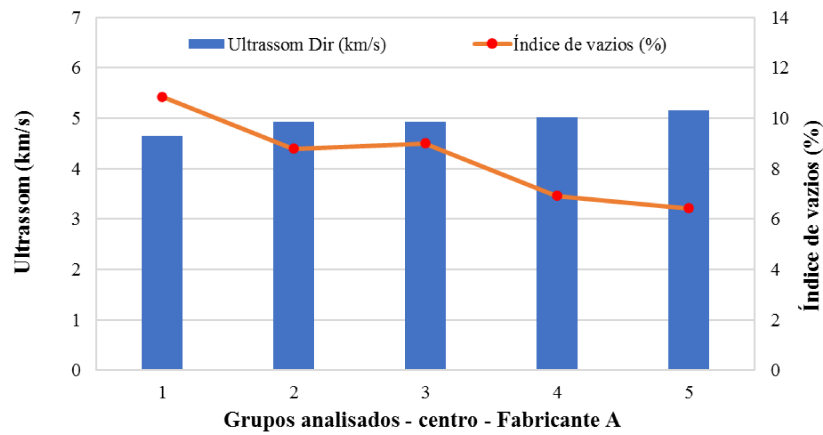
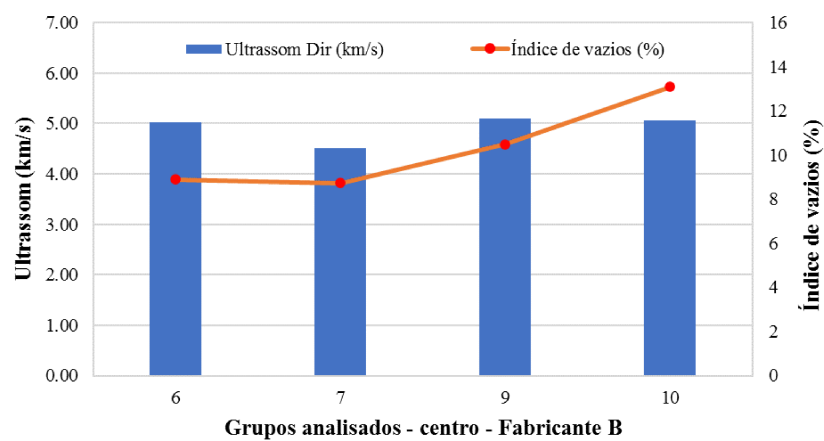


Figura 162: Ensaio de ultrassom e índice de vazios – Fabricante B – centro



5.1.3 Ensaio de módulo dinâmico por ultrassom

Nos resultados apresentado na figuras 115, foram realizadas análises da variação dos resultados ao longo das faces 1-3 da mesma maneira que no ensaio de ultrassom. Assim, após a verificação de todos pressupostos estatísticos, foi realizado o teste de ANOVA que está apresentado nas tabelas 22.

Tabela 22. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de módulo dinâmico – face 1-3

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor ρ)
					Face 1-3
1	A	A1	2011	Usados	0.1637
2		A1	2011	Usados	0.0118
3		A1	2016	Não usados	0.0048
4		A2	2015	Usados	0.0008
5		A2	2016	Usados	0.0597
6	B	B1	2011	Usados	0.6530
7		B2	2014	Usados	0.3943
9		B2	2019	Não usados	0.8416
10		B2	2021	Não usados	0.0573

Os resultados da tabela 22 indicam que para o fabricante A, nos grupos 2, 3 e 4 houve diferenças diferença significativa entre os resultados da velocidade de ultrassom entre as regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito ao longo das faces 1-3, pois tem-se o valor $\rho < 0,05$, logo a hipótese nula H_0 para estes grupos foi rejeitada. Assim, da utilização do teste de *Tukey* para verificar qual região difere das demais (ver Apêndice A9), resultou que a região do centro difere das demais. Para o fabricante B não houve diferença significativa entre os resultados de módulo dinâmico. Do mesmo modo que no ensaio de ultrassom, neste ensaio, para análise dos resultados entre os grupos de cada fabricante, considerou-se apenas os resultados de um dos ombros e do centro. Os resultados estão apresentados no Apêndice A10 e A11. Considerando a região dos ombros, para o fabricante A tem-se $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$ e $G3 \neq G5$ e para o fabricante B tem-se $G6 \neq G7$, $G6 \neq G10$, $G7 \neq G9$ e $G9 \neq G10$. Neste ensaio, para a região dos ombros as variáveis de estudo desta pesquisa não tiveram influência pelos mesmos motivos apresentados no ensaio de ultrassom na face 02, modo indireto.

Para região do centro e fabricante A, tem-se $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$, $G2 \neq G5$, $G3 \neq G4$ e $G3 \neq G5$. Para o fabricante B tem-se $G6 \neq G7$, $G6 \neq G10$, $G7 \neq G9$, $G7 \neq G10$ e $G9 \neq G10$.

Nesta região, para ambos os fabricantes, não se verificou a influência das variáveis de estudo nos resultados obtidos.

Todos os grupos apresentaram resultados de módulo dinâmico superiores à 40 GPa. De acordo com Thomaz et al. (2021), concretos com resistência à compressão de 45 MPa tendem a apresentar valores de módulo de elasticidade dinâmico na faixa de 40 à 50 GPa. A diferença apresentada entre os grupos de dormentes pode estar relacionada a variação na dosagem do concreto entre os grupos de dormentes. Pois, o principal parâmetro de composição do concreto que influencia o módulo de elasticidade é o esqueleto granular, que possivelmente variou para os concretos dos dormentes dos grupos estudados (CAMPOS et al., 2020).

Foi analisada a relação entre o ensaio de módulo por ultrassom com o ensaio de resistência a compressão. Os gráficos das figuras 163 à 166, mostraram que de maneira semelhante ao ensaio de ultrassom, o ensaio de módulo não apresentou relação direta com a resistência à compressão para ambos fabricantes.

Figura 163: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo

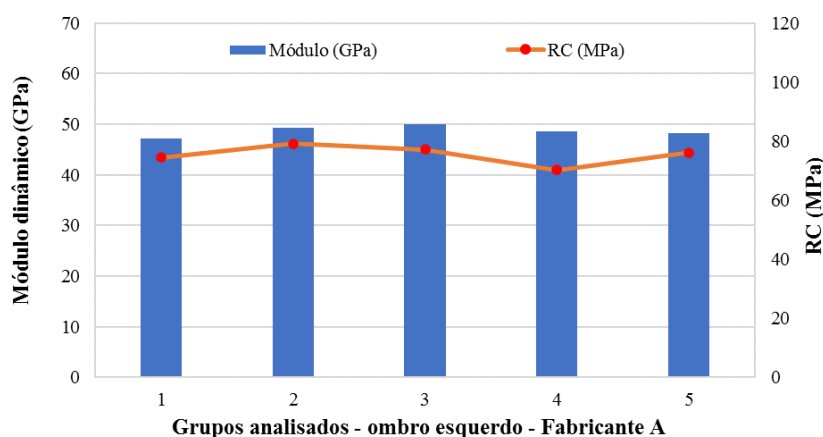


Figura 164: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo

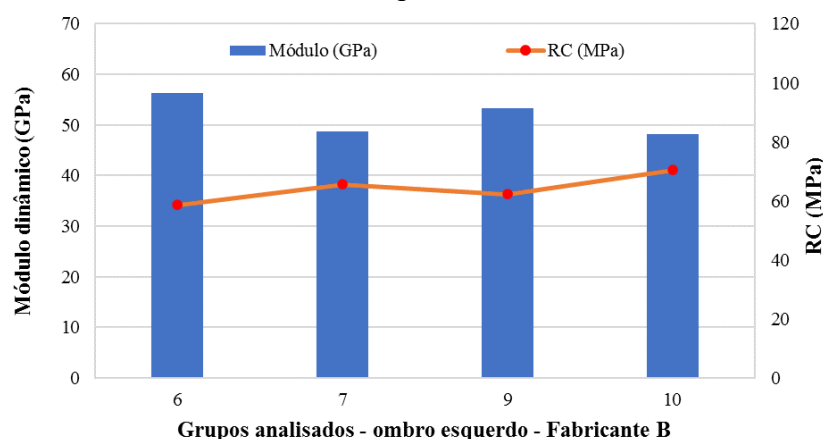


Figura 165: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante A – centro

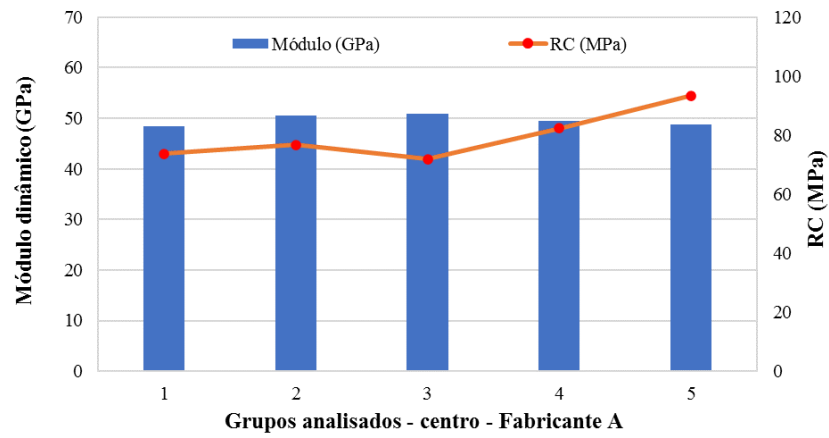
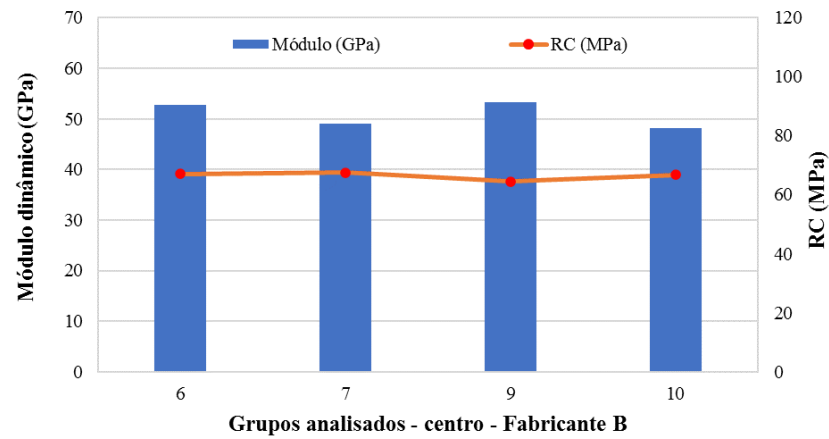


Figura 166: Ensaio de módulo dinâmico e resistência à compressão – Fabricante B – centro



5.1.4 Ensaio de resistividade elétrica superficial

Para os resultados apresentados nas figuras 116, 117 e 118, foi realizada análise da variação dos resultados ao longo de cada face e de cada região, de maneira análoga ao ensaio de esclerometria. Desta forma, as tabelas 23 e 24 apresentam o valor de p do teste da ANOVA ao longo de cada face e de cada região respectivamente.

Tabela 23. Resultados do teste ANOVA para direção longitudinal

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor p)		
					Face 1	Face 2	Face 3
1	A	A1	2011	Usados	0,7029	0,4877	0,5341
2		A1	2011	Usados	0,9452	0,1593	0,9694
3		A1	2016	Não usados	0,0974	0,8185	0,1190
4		A2	2015	Usados	0,9829	0,7780	0,8370
5		A2	2016	Usados	0,8054	0,9166	0,6707
6	B	B1	2011	Usados	0,1040	0,1563	0,2978
7		B2	2014	Usados	0,6680	0,9149	0,5544
9		B2	2019	Não usados	0,3622	0,2136	0,6931
10		B2	2021	Não usados	0,2704	0,9590	0,8589

Tabela 24. Resultados do teste ANOVA para direção transversal

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor p)		
					Ombro esq	Centro	Ombro dir
1	A	A1	2011	Usados	0,3840	0,5510	0,8160
2		A1	2011	Usados	0,3750	0,5930	0,2910
3		A1	2016	Não usados	0,9230	0,3700	0,0690
4		A2	2015	Usados	0,8910	0,5340	0,8870
5		A2	2016	Usados	0,6660	0,4590	0,5770
6	B	B1	2011	Usados	0,0520	0,5040	0,9960
7		B2	2014	Usados	0,8710	0,9340	0,8920
9		B2	2019	Não usados	0,1040	0,1060	0,3420
10		B2	2021	Não usados	0,1150	0,4760	0,5420

Com base nos resultados das tabelas 23 e 24 pode-se afirmar que não houve diferença significativa entre os resultados ao longo de cada face para as regiões (ombros e centro) e ao longo de cada região dos dormentes de ambos os fabricantes. Pois, tem-se o valor $\rho > 0,05$, logo a hipótese nula H_0 é aceite. Sendo assim, os resultados da análise estatística para

comparação dos resultados entre os grupos estão apresentados no Apêndice A12 e A13 para face 01, apêndice A14 e A15 para face 02.

Considerando a face 01 e a região dos ombros, observa-se que para o fabricante A e B, os resultados não apresentaram diferenças significativas. Na região do centro, para o fabricante A tem-se: $G2 \neq G3$ e $G2 \neq G5$. Neste caso a condição dos grupos de dormentes não teve influência nos resultados, pois embora o grupo 2 (usado) tenha apresentado diferença significativa em relação aos grupos 3 e 5 (não usados), os grupos 1 e 4 não apresentaram diferença significativas comparados aos grupos 3 e 5. Já a idade dos grupos de dormentes pode ter certa influência nos resultados uma vez que grupos de dormentes com idade menores apresentam maiores valores de resistividade. A cidade de fabricação também apresentou ligeira influência uma vez que os grupos produzidos na cidade A2 tiveram maiores valores de resistividade. Para o fabricante B tem-se: $G6 \neq G7$, $G6 \neq G9$ e $G9 \neq G10$. Observa-se que a condição de cada grupo não teve influência devido ao fato de que grupos de dormentes com a mesma condição apresentam diferenças significativas nos resultados. Já a idade pode ter influência uma vez que dormentes com menor idade tendem a apresentar valores de resistividade mais altos comparados com os de maior idade. A cidade de fabricação teve ligeira influência, pois o grupo 6 produzido na cidade B1 apresentou diferença significativa em comparação com os grupos produzidos na cidade B2.

Considerando a face 02 e a região dos ombros, observa-se que para o fabricante A, tem-se: $G2 \neq G3$, $G2 \neq G4$ e $G2 \neq G5$. Neste caso, a condição dos grupos de dormentes não apresentou influência nos resultados. A idade pode ter certa influência nos resultados uma vez que os dormentes com idades mais recentes apresentaram valores maiores em relação a aqueles com maior idade, pois os grupos 1 e 2 apresentaram valores mais baixos comparados com os grupos 3, 4 e 5, apesar de o grupo 1 não apresentar diferença estatística significativa com os grupos 3, 4 e 5. A cidade de fabricação também apresentou ligeira diferença pelo fato de que os dormentes produzidos na cidade A2 apresentarem de certo modo valores maiores a aqueles produzidos na cidade A1. Para o fabricante B tem-se que $G6 \neq G10$. Neste caso a condição desse grupo não teve influência nos resultados. Já a idade pode ter tido influência uma vez que o grupo 6 apresenta uma idade de cerca de 10 anos superior à do grupo 10. A cidade de fabricação não apresentou influência nos resultados.

Considerando a região do centro para a face 02 e fabricante A tem-se $G2 \neq G4$. Neste caso, a condição de uso dos dormentes de cada grupo, pode não ter influência, embora para os grupos de dormentes não usados não se verificaram diferenças significativas. A idade e

a cidade de fabricação também não tiveram influência. Para o fabricante B não houve diferenças significativas entre os resultados.

A corrosão das armaduras de concreto está diretamente ligada à resistividade elétrica. O risco de corrosão da armadura torna-se insignificante para valores de resistividade elétrica superiores a 20 k Ω cm (REDDY et al., 2020). Portanto, pode-se concluir das figuras 116 à 118 que todos os concretos estudados apresentam um risco insignificante de corrosão, pois as resistividades elétricas medidas foram todas superiores a 20 k Ω cm.

Para a região do ombro e centro, os resultados de ambos os fabricantes mostraram relação com os resultados do ensaio de resistência à compressão conforme as figuras 167, 168, 169 e 170. Os resultados do fabricante B mostraram relação direta com a resistência à compressão, enquanto para o fabricante A não foi possível observar relação de proporcionalidade.

Figura 167: Ensaio de resistividade elétrica e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo

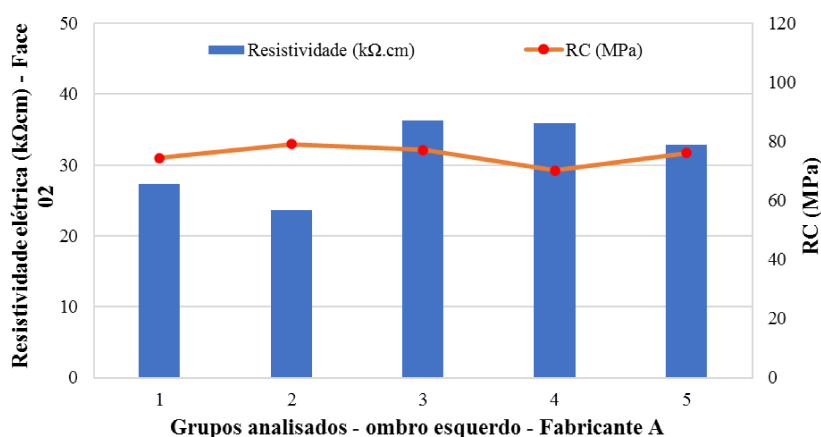


Figura 168: Ensaio de resistividade elétrica e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo

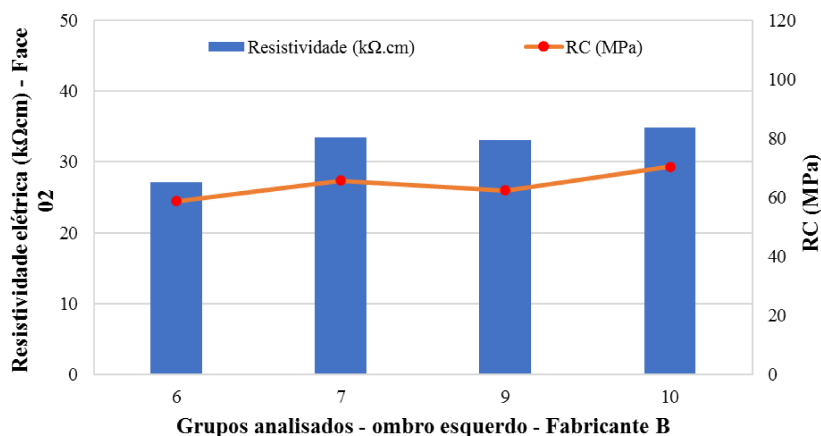


Figura 169: Ensaio de resistividade elétrica e resistência à compressão – Fabricante A – centro

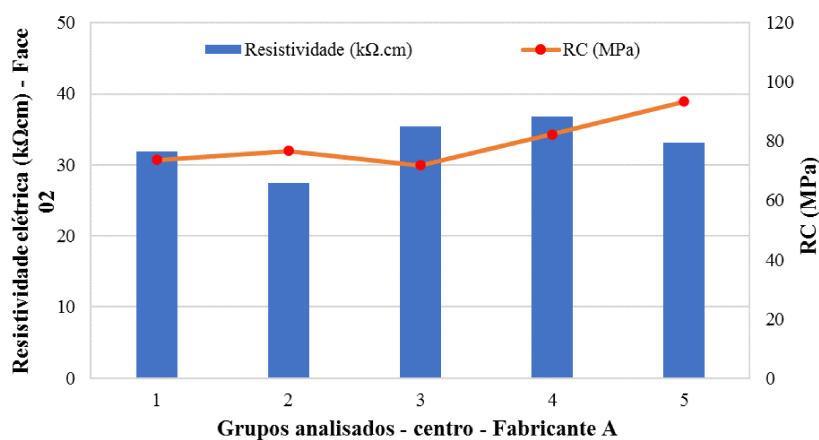
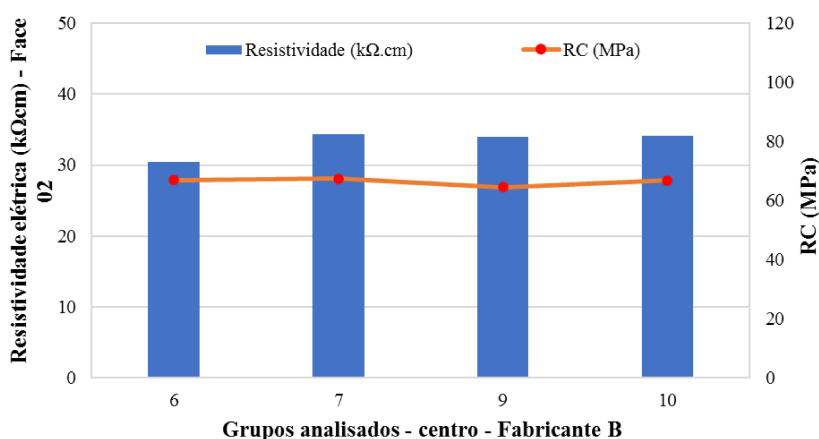


Figura 170: Ensaio de esclerometria e resistência à compressão – Fabricante B – centro



5.1.5 Ensaio de potencial de corrosão

No ensaio de potencial de corrosão, as áreas com suspeita de corrosão no aço apresentam-se mais negativas e o risco de corrosão é avaliado com base na tabela 6 apresentada na secção 2.2.4 para o eletrodo de referência Cu/CuSO₄.

Para o fabricante A, os mapas de contorno do grupo 1 e grupo 2 mostraram os potenciais mais negativos nos cantos e no centro dos dormentes. O valor mais negativo do potencial nesses grupos foi cerca de -350 mV. Segundo a tabela 6 para estes grupos a atividade de corrosão é incerta nessas regiões. Os grupos 3, 4 e 5 apresentaram valores de potencial mais negativo em cerca de -250 mV, indicando que a probabilidade de que a corrosão não está a ocorrer é de 90%. Para este fabricante, a idade dos dormentes pode ter influência nos resultados uma vez que os grupos 1 e 2, apresentam idades mais elevadas em relação aos outros grupos.

Para o fabricante B, os mapas de contorno dos grupos 6, 7, 9 e 10 indicam que a zona com suspeita de corrosão é a parte dos ombros e do centro. Mas, o potencial mais negativo apresentado nessa região foi de -250 mV, indicando assim uma probabilidade de 90% de que a corrosão não esteja ocorrendo, conforme a tabela 6. Para este fabricante, as variáveis de estudo não tiveram influência nos resultados.

5.1.6 Ensaio de tomografia por ultrassom

Este ensaio foi utilizado com o objetivo de avaliar a descontinuidade no concreto dos dormentes de cada grupo. Para o fabricante A, as imagens de tomografia dos grupos 1 e 2 mostraram descontinuidades na região central e nos ombros. Isso pode justificar o resultado do potencial de corrosão para estes grupos. Também se observa que a camada superficial (recobrimento) não foi muito afetada uma vez que as descontinuidades tendem a se concentrar mais ao longo do eixo longitudinal do dormente. Os grupos 3 e 4 não apresentaram descontinuidades. Para o grupo 5 as descontinuidades apresentadas não foram confirmadas pelo ensaio de potencial de corrosão. Para este fabricante, assim como no ensaio de potencial a idade teve influência nos resultados.

Para o fabricante B, os grupos 6 e 7 apresentaram descontinuidades no ombro direito e centro. Elas estiveram muito próximas da borda podem de certo modo, estar refletidos no ensaio de potencial de corrosão. O grupo 9 apresentou um comportamento semelhante ao do grupo 5. Já o grupo 10 apresentou descontinuidades ao longo de todo o dormente, mas de maneira mais acentuada na região do centro. O ensaio de potencial de corrosão para este grupo em certa medida indica os mesmos resultados. Para este fabricante, as variáveis de estudo não se verificarão.

5.1.7 Ensaio de georradar (GPR)

Este ensaio foi utilizado com o objetivo de auxiliar na validação do ensaio de tomografia ultrassônica. As descontinuidades apresentadas nas imagens geradas pelo GRP não coincidem com aquelas apresentadas pelo ensaio de tomografia, tanto para a família A como para a família B. Nas imagens geradas, nos casos em que apresentam possíveis descontinuidades, não foi possível identificar a localização da mesma como por exemplo a imagem de GPR do grupo 1 (Figura 137). Nos casos em que a imagem de tomografia apresentou descontinuidades, não foi possível confirmá-las através das imagens de GPR. Como exemplo

tem-se a imagem de GPR do grupo 10 (Figura 145) que não apresenta descontinuidade, enquanto a imagem de tomografia do mesmo grupo (Figura 136) apresenta descontinuidades. Segundo Kuchipudi et al. (2022), a técnica de GPR é muito utilizada na detecção de armaduras no interior do concreto, embora não seja a única aplicação. Para identificação de descontinuidades não mostrou ser viável a sua aplicação.

5.2 ENSAIOS DESTRUTIVOS

5.2.1 Ensaio de resistência à compressão

Nos resultados apresentados na figura 146, após a verificação dos pressupostos estatísticos de normalidade e igualdade de variância, foi realizado o teste de ANOVA com 95% de significância. O objetivo do teste era de verificar se existe diferença significativa entre os resultados da resistência à compressão das regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito dos dormentes, dentro de cada grupo. A tabela 25 apresenta os valores de p obtidos no teste ANOVA.

Tabela 25. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de resistência à compressão

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor p)
1	A	A1	2011	Usados	0,1858
2		A1	2011	Usados	0,9494
3		A1	2016	Não usados	0,4775
4		A2	2015	Usados	0,0702
5		A2	2016	Usados	0,8391
6	B	B1	2011	Usados	0,0548
7		B2	2014	Usados	0,8512
9		B2	2019	Não usados	0,5174
10		B2	2021	Não usados	0,5148

Os resultados da tabela 25 mostraram que não há diferenças significativas ($p > 0,05$) nos resultados dentro de cada grupo. Assim, para análise dos resultados fora de cada grupo, ou seja, entre grupos de dormentes de cada fabricante, levou-se em conta apenas, os resultados do ensaio do ombro esquerdo e centro. Assim, conforme se apresenta nos apêndices A16 e A17, para análise destes valores, foi realizado o teste de *Tukey*, nos casos em que se verificou a igualdade de variância e a hipótese de igualdade entre as médias rejeitadas por ANOVA

Os resultados mostram que para a região do ombro apenas os resultados do fabricante B apresentaram diferenças significativas, ou seja, tem-se $G6 \neq G10$. Para o fabricante A há uma similaridade dos resultados de resistência à compressão independentemente da condição do uso, ano de fabricação e cidade de fabricação. Para o fabricante B, tem-se que o grupo 10 cujos dormentes não foram submetidos a solicitação por não serem instalados na ferrovia, apresentaram melhor desempenho mecânico. Já o grupo 6 que foi instalado na ferrovia, apresenta o menor valor de resistência à compressão. Para este fabricante, os resultados podem ter sido influenciados pelas variáveis de estudo desta pesquisa, embora os resultados para o fabricante A contrastam essa possibilidade.

Por outra, em ambos fabricantes, para esta região os resultados de resistência à compressão apresentaram relação direta com o índice de vazios, ou seja, quanto maior for o valor deste menor é a resistência, conforme a figura 151 e figura 152. De acordo com Medeiros-Junior et al. (2019), os parâmetros que influenciam os dois ensaios são semelhantes. Portanto, quanto maior o índice de vazios, maior a porosidade. Isso implica resistência à compressão reduzida.

Figura 171: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante A - ombro

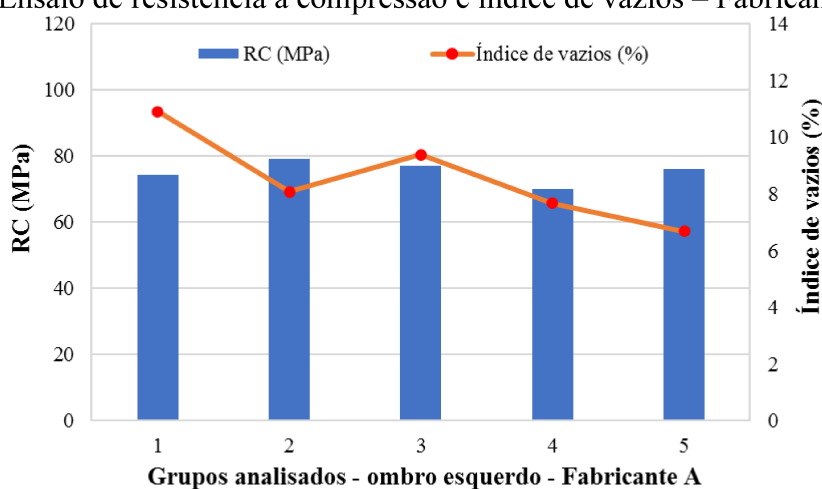
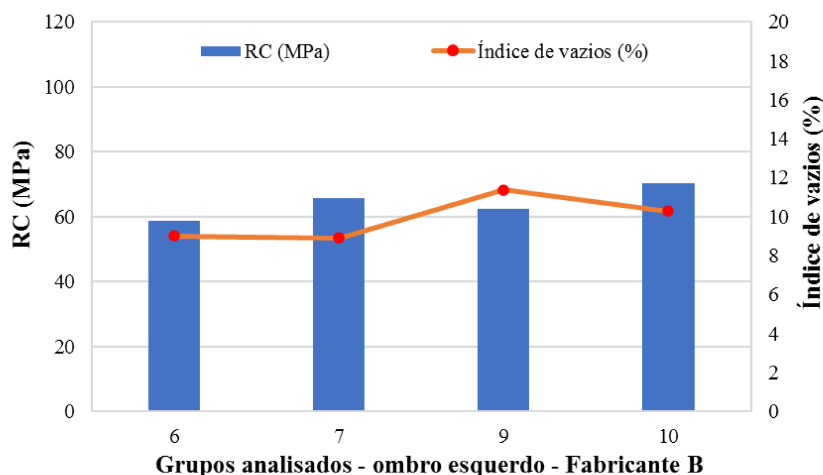


Figura 172: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante B- ombro



Os resultados da região do centro mostram que o fabricante B não apresentou variação nos resultados. Já os resultados apresentados pelo fabricante A apresentam diferenças significativas entre si, ou seja, $G1 \neq G5$ e $G3 \neq G5$. O grupo 5 apresentou melhor desempenho mecânico a passo que os grupos 1 e 3 os menores. Para este caso, é possível que a variável cidade de fabricação tenha tido influência nos resultados. As variáveis idade e cidade de fabricação podem não ter influência pelo fato dos grupos 3 e 5 terem mesma condição de uso e ano de fabricação. Em ambos fabricantes, para esta região os resultados de resistência à compressão também apresentaram relação direta com o índice de vazios conforme a figura 153 e figura 154.

Figura 173: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante A - centro

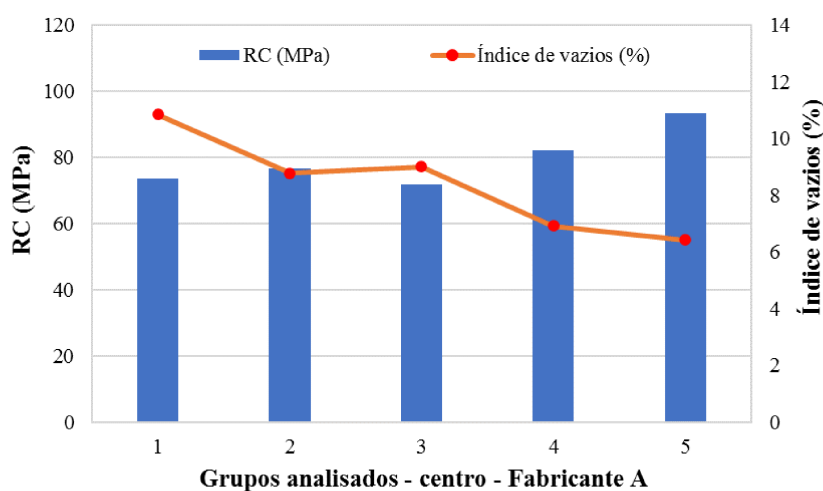
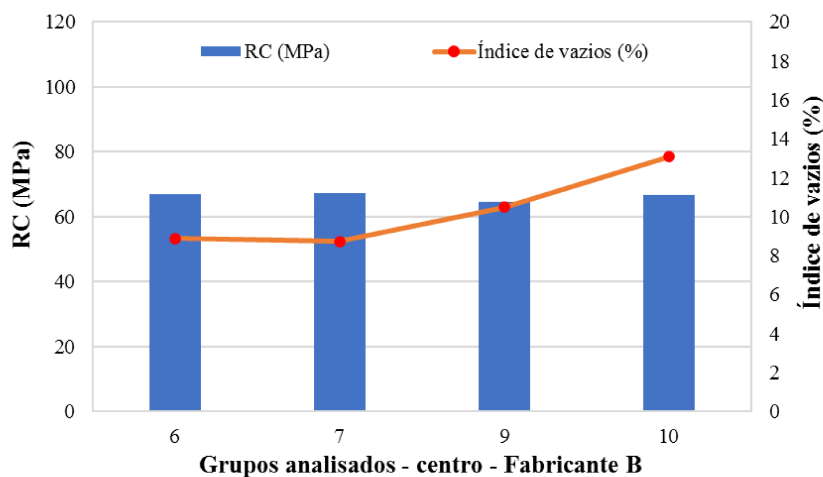


Figura 174: Ensaio de resistência à compressão e índice de vazios – Fabricante B - centro



5.2.2 Índice de vazios

A semelhança do ensaio de resistência compressão, nos resultados da tabela 17, após verificação de todos pressupostos estatísticos de normalidade e igualdade de variância foi feito o teste ANOVA com 95% de significância, para verificar se existe diferença significativa entre os resultados do índice de vazios nas regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito dos dormentes dentro de cada grupo. A tabela 26 apresenta os valores de p obtidos no teste ANOVA.

Tabela 26. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de índice de vazios

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor ρ)
					Face 1-3
1	A	A1	2011	Usados	0,8303
2		A1	2011	Usados	0.3810
3		A1	2016	Não usados	0.5691
4		A2	2015	Usados	0.0824
5		A2	2016	Usados	0.5721
6	B	B1	2011	Usados	0.2007
7		B2	2014	Usados	0.6460
9		B2	2019	Não usados	0.0039
10		B2	2021	Não usados	0.0046

Os resultados da tabela 26 indicam que para o fabricante A não houve diferença significativa entre os resultados, dentro de cada grupo. Para o fabricante B, os resultados indicam que nos grupos 9 e 10 houve diferenças significativas entre os resultados nas regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito, pois tem-se o valor $\rho < 0,05$. Assim, após a verificação dos pressupostos de normalidade e igualdade de variância o teste *Tukey* foi utilizado para verificar qual região difere das demais. Os resultados estão apresentados no Apêndice A18, e mostraram que a região do ombro esquerdo difere das demais. Assim, neste ensaio, para análise dos resultados entre os grupos de dormentes de cada fabricante, considerou-se apenas os resultados do ombro esquerdo e do centro. Assim, o teste *Tukey*, foi novamente utilizado nos casos em que se verificou a igualdade de variância e a hipótese de igualdade entre as médias rejeitadas por ANOVA. Os Apêndices A19 e A20 apresentam os resultados da análise estatística para essas regiões.

Os resultados mostram que para a região do ombro esquerdo, ambos fabricantes apresentaram diferenças significativas entre as médias de cada grupo. O fabricante A, as diferenças foram as seguintes: $G1 \neq G2$, $G1 \neq G4$, $G1 \neq G5$ e $G3 \neq G5$. Para este fabricante, os grupos 1 e 3 apresentaram maior índice de vazios ao passo que os grupos 2, 4 e 5 os menores. Para esta região, nos resultados desse fabricante, não foi possível verificar a influência das variáveis de estudo desta pesquisa uma vez que dormentes com a mesma condição de uso, data e cidade de fabricação apresentaram diferenças significativas nos resultados obtidos. Para o fabricante B, tem-se as seguintes diferenças entre os resultados: $G6 \neq G9$, $G6 \neq G10$, $G7 \neq G9$, $G7 \neq G10$ e $G9 \neq G10$. Para este fabricante, os resultados do grupo 9 diferem significativamente em relação aos dos demais grupos, pois trata-se do grupo que apresentou maior índice de vazios em relação aos demais. Por outro lado, não foi possível verificar as influências das variáveis de estudo desta pesquisa tal como para o fabricante A. Para a região dos ombros, o ensaio mostrou relação direta com o ensaio de resistência à compressão conforme se observa nas figuras 151 e 152.

Os resultados da região do centro mostram as seguintes diferenças significativas para o fabricante A: $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$, $G1 \neq G4$, $G1 \neq G5$, $G2 \neq G4$, $G2 \neq G5$, $G3 \neq G4$ e $G3 \neq G5$. Para este fabricante, a região do centro apresenta comportamento semelhante ao da região do ombro. Ou seja, os grupos 1 e 3 apresentaram maior índice de vazios ao passo que os grupos 2, 4 e 5 os menores. E do mesmo modo, não foi possível verificar a influência das variáveis de estudo desta pesquisa. Para o fabricante B, tem-se as seguintes diferenças entre os resultados: $G6 \neq G9$, $G6 \neq G10$, $G7 \neq G9$, $G7 \neq G10$ e $G9 \neq G10$. Para este fabricante, a região do centro apresenta comportamento semelhante ao da região do ombro, com um ligeiro diferencial de que

desta vez, o grupo 10 apresentou maior valor de índice de vazios. Assim, também não foi possível verificar as influências das variáveis de estudo desta pesquisa. Para a região do centro, o ensaio também mostrou relação direta com o ensaio de resistência à compressão conforme se observa nas figuras 153 e 154.

5.2.3 Absorção por capilaridade

Nos resultados apresentados na tabela 18, após a verificação de todos pressupostos estatísticos de normalidade e igualdade de variância, foi realizado o teste de ANOVA que está apresentado na tabela 27, com o objetivo de verificar se existe diferença entre os resultados dos ombros e centro de cada dormente dentro de cada grupo.

Tabela 27. Resultados do teste ANOVA para o ensaio de absorção por capilaridade

Grupo	Fabricante	Cidade	Ano	Condição	ANOVA (Valor ρ)
1	A	A1	2011	Usados	0,0936
2		A1	2011	Usados	0.4431
3		A1	2016	Não usados	0.0173
4		A2	2015	Usados	0.0002
5		A2	2016	Usados	0.4682
6	B	B1	2011	Usados	0.6215
7		B2	2014	Usados	0.2044
9		B2	2019	Não usados	0.7501
10		B2	2021	Não usados	0.1199

Os resultados da tabela 26 indicam que para o fabricante A, nos grupos 3 e 4 houve diferenças significativa nos resultados entre as regiões do ombro esquerdo, centro e ombro direito, pois tem-se o valor $\rho < 0,05$. O resultado do teste de *Tukey* para verificar qual região difere das demais dentro desses grupos, está apresentado no apêndice A22. Para o grupo 3 a região do centro difere das demais e para o grupo 4 o ombro esquerdo difere das demais. Assim, para análise dos resultados entre os grupos de cada fabricante, considerou-se apenas os resultados do ombro esquerdo e do centro. Para o fabricante B não houve diferença significativa entre os resultados. Assim, o teste *Tukey*, foi novamente utilizado nos casos em que se verificou a igualdade de variância e a hipótese de igualdade entre as médias rejeitadas por ANOVA. Os Apêndices A23 e A24 apresentam os resultados da análise estatística para essas regiões.

Os resultados mostram que para a região do ombro esquerdo, ambos fabricantes apresentaram diferenças significativas entre as médias de cada grupo. Para o fabricante A, as diferenças foram as seguintes: $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$, $G1 \neq G5$, $G2 \neq G3$, $G2 \neq G4$, $G3 \neq G4$ e $G3 \neq G5$. Para este fabricante, os grupos 1 e 3 apresentaram maior absorção capilar ao passo que os grupos 2, 4 e 5 os menores. Para esta região, nos resultados desse fabricante, não foi possível verificar a influência das variáveis de estudo desta pesquisa uma vez que dormentes com a mesma condição de uso, data e cidade de fabricação apresentaram diferenças significativas nos resultados obtidos. Para o fabricante B, tem-se as seguintes diferenças entre os resultados: $G6 \neq G7$, $G6 \neq G9$, $G6 \neq G10$ e $G7 \neq G9$. Para este fabricante, os resultados do grupo 9 diferem significativamente em relação aos dos demais grupos, pois trata-se do grupo que apresentou maior absorção capilar em relação aos demais. Por outro lado, não foi possível verificar as influências das variáveis de estudo desta pesquisa tal como para o fabricante A. Conforme figuras 155 e 156, para a região dos ombros o ensaio mostrou relação com o ensaio de resistência à compressão, uma vez que são parâmetros inversamente relacionados. Ou seja, a medida que um aumenta, outro tende a diminuir (PINTO et al., 2018; MEDEIROS-JUNIOR et al., 2019). O ensaio de absorção capilar mostrou relação diretamente proporcional com o ensaio de índice de vazios conforme se observa nas figuras 157 e 158. De acordo com Kurda et al. (2019), existe uma relação diretamente proporcional entre os ensaios de absorção de água por capilaridade e índice de vazios, ou seja, a medida que um aumenta o outro também aumenta.

Figura 175: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante A – ombro esquerdo

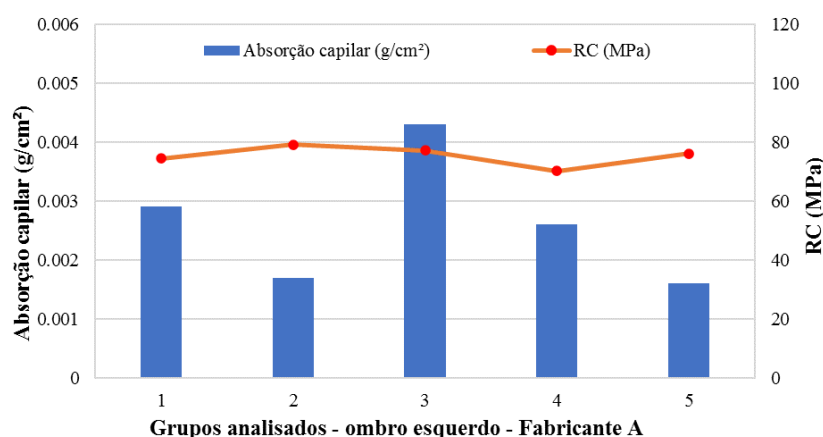


Figura 176: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante B – ombro esquerdo

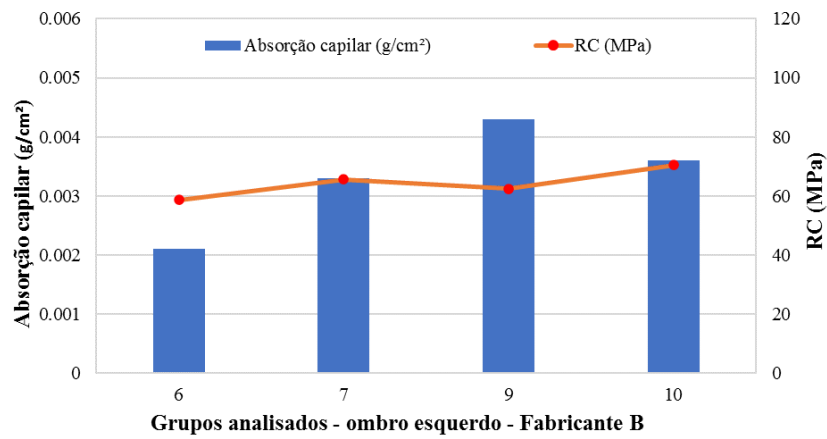


Figura 177: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante A – ombro esquerdo

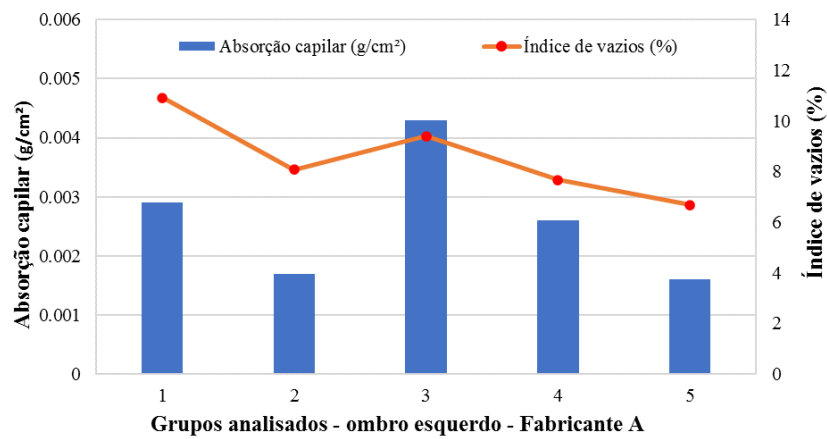
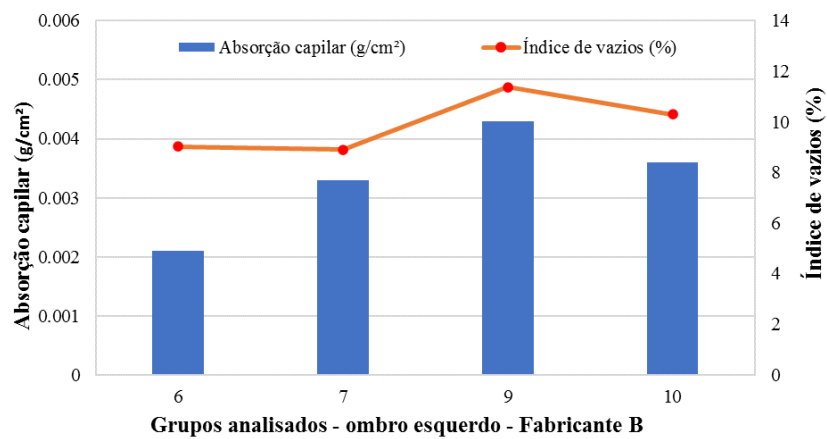


Figura 178: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante B – ombro esquerdo



Os resultados da região do centro mostram as seguintes diferenças significativas para o fabricante A: $G1 \neq G2$, $G1 \neq G3$, $G1 \neq G4$, $G1 \neq G5$, $G2 \neq G3$, $G3 \neq G4$, $G3 \neq G5$ e $G4 \neq G5$. Para este fabricante, a região do centro apresenta comportamento semelhante ao da região do ombro. Ou seja, os grupos 1 e 3 apresentaram maior absorção capilar enquanto os grupos 2, 4 e 5 os menores. E do mesmo modo, não foi possível verificar a influência das variáveis de estudo desta pesquisa. Para o fabricante B, tem-se as seguintes diferenças entre os resultados: $G6 \neq G7$, $G6 \neq G9$ e $G6 \neq G10$. Para este fabricante, a região do centro apresenta comportamento semelhante ao da região do ombro. Assim, também não foi possível verificar as influências das variáveis de estudo desta pesquisa.

Para a região do centro, o ensaio também mostrou relação direta com o ensaio de resistência à compressão (ver figuras 159 e 160) e índice de vazios (ver figuras 161 e 162).

Figura 179: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante A – centro

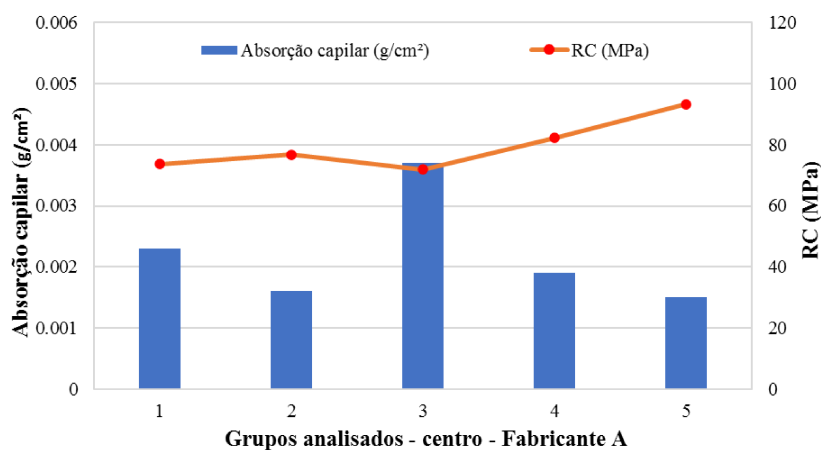


Figura 180: Ensaio de absorção capilar e resistência à compressão – Fabricante B – centro

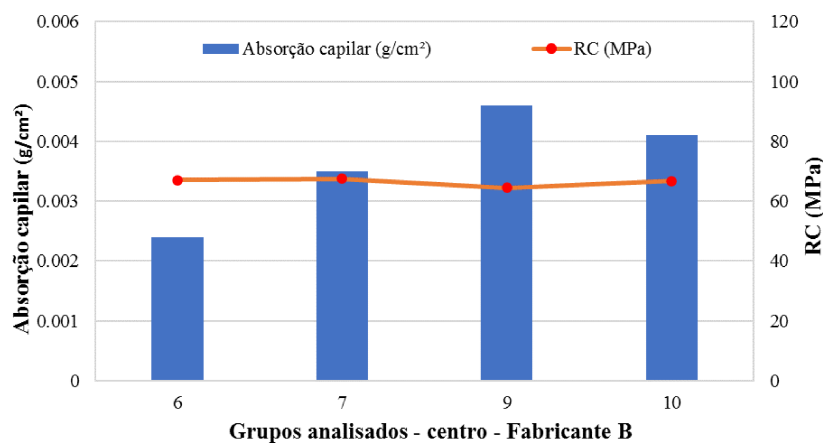


Figura 181: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante A – centro

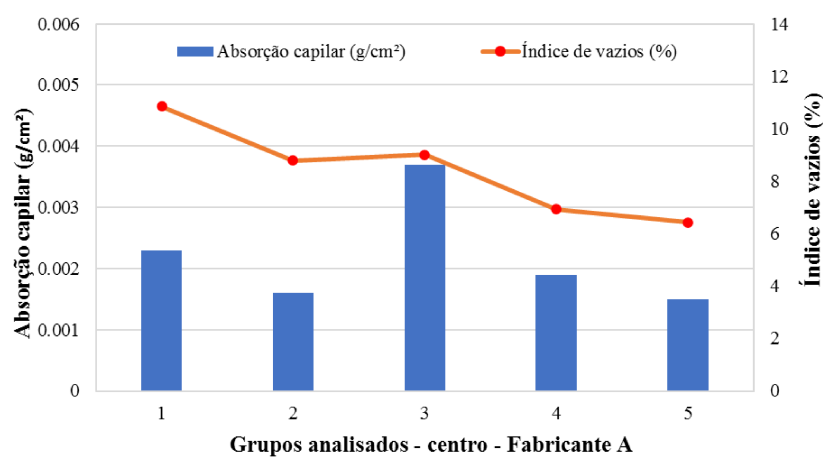
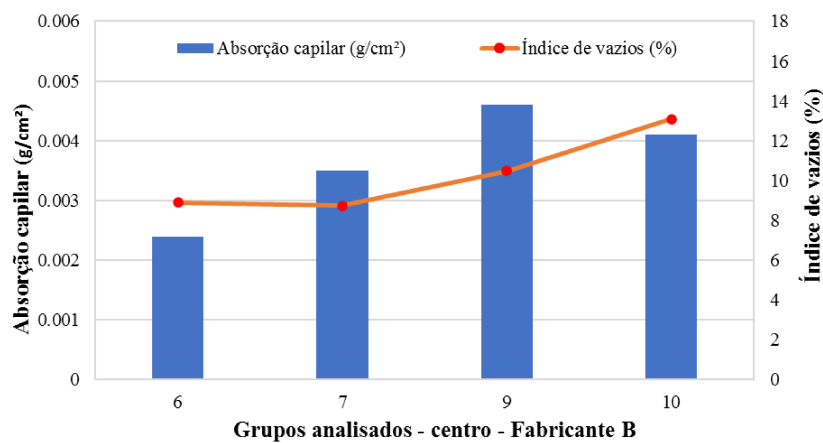


Figura 182: Ensaio de absorção capilar e índice de vazios – Fabricante B – centro



5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E ENSAIOS FISICOS E MECANICO

5.3.1 Correlação entre resistência à compressão e esclerometria

As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples. Foram testados diferentes tipos de regressões tais como: linear, polinomial e de potência, conforme a tabela 28 e gráficos das figuras 183 à 190. A curva que melhor se ajusta é tida em função do coeficiente de determinação R^2 . Assim, observa-se que a regressão polinomial de segundo grau apresentou maiores valores em relação às demais, mas porém muito baixo do esperado para uma curva de correlação mínima aceitável ($R^2 \geq 60\%$). Ainda assim, para valores superiores à 50%, a curva não apresentou comportamento semelhante a de outros autores que em seus estudos apontam a existência de proporcionalidade direta entre a resistência à compressão e esclerometria (SANCHEZ; TARRANZA, 2015; JAIN et al., 2022; JAIN *et al.*, 2022). As correlações encontradas não apresentaram esse comportamento.

Tabela 28. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e esclerometria

Fabricante	Fac e	Região	Tipo de regressão					
			Linear		Pol. 2º grau		Potência	
			Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
A	01	Ombro	$y = 0,5012x + 41,101$	$R^2 = 0,0193$	$y = 2,9024x^2 - 395,65x + 13557$	$R^2 = 0,6131$	$y = 12,932x^{0,417}$	$R^2 = 0,0185$
		Centro	$y = -3,0135x + 286,56$	$R^2 = 0,1361$	$y = 1,568x^2 - 219,39x + 7749,5$	$R^2 = 0,1482$	$y = 2E+06x^{-2,422}$	$R^2 = 0,1371$
	02	Ombro	$y = 1,5688x - 27,94$	$R^2 = 0,7962$	$y = -0,5096x^2 + 68,479x - 2222,7$	$R^2 = 0,9072$	$y = 0,2243x^{1,3891}$	$R^2 = 0,7942$
		Centro	$y = -1,048x + 149,31$	$R^2 = 0,0311$	$y = -2,264x^2 + 301,46x - 9951,5$	$R^2 = 0,2382$	$y = 4481,5x^{-0,961}$	$R^2 = 0,0284$
B	01	Ombro	$y = 1,3498x - 24,08$	$R^2 = 0,4973$	$y = -0,2414x^2 + 32,783x - 1046$	$R^2 = 0,525$	$y = 0,2027x^{1,377}$	$R^2 = 0,4964$
		Centro	$y = -0,2581x + 83,116$	$R^2 = 0,2632$	$y = -0,096x^2 + 12,039x - 310,14$	$R^2 = 0,342$	$y = 187,58x^{-0,249}$	$R^2 = 0,259$
	02	Ombro	$y = -0,0784x + 69,363$	$R^2 = 0,0009$	$y = -2,1588x^2 + 282,06x - 9143$	$R^2 = 0,4133$	$y = 63,892x^{0,0008}$	$R^2 = 0,0007$
		Centro	$y = -0,3257x + 87,572$	$R^2 = 0,43$	$y = -0,1695x^2 + 21,498x - 613,8$	$R^2 = 0,9371$	$y = 245,42x^{-0,313}$	$R^2 = 0,4105$

Figura 183: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante A – ombro esquerdo face 01

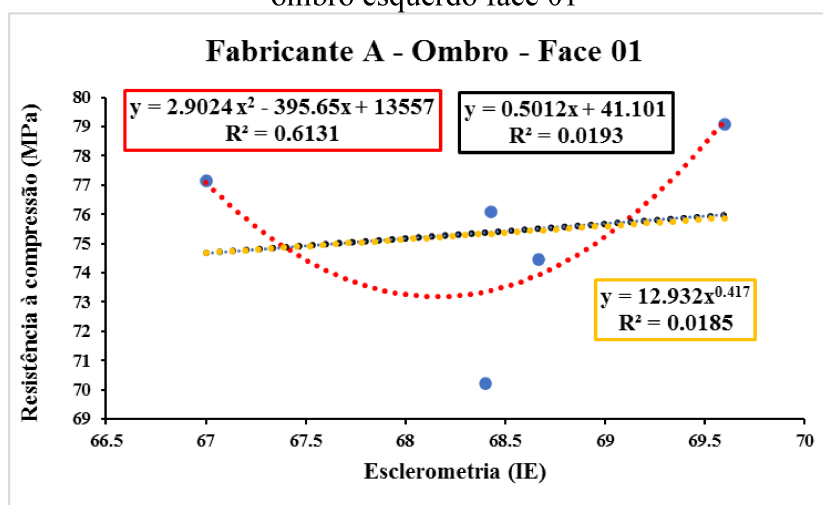


Figura 184: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – ombro esquerdo face 01

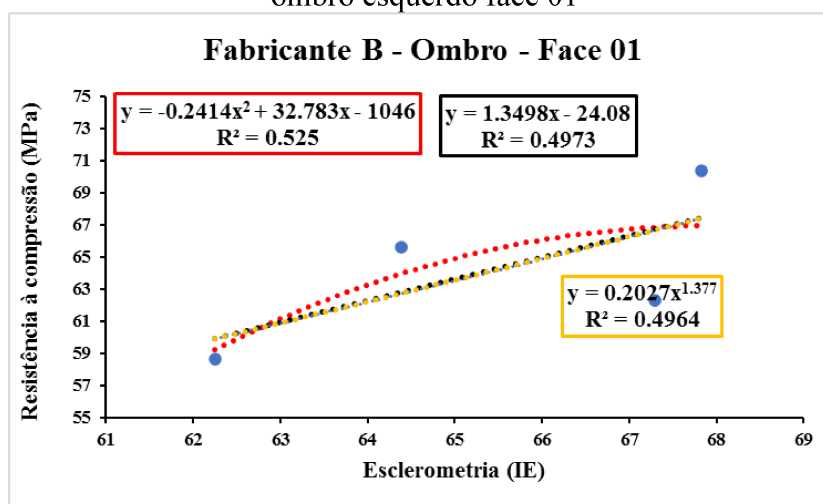


Figura 185: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante A – ombro esquerdo face 02

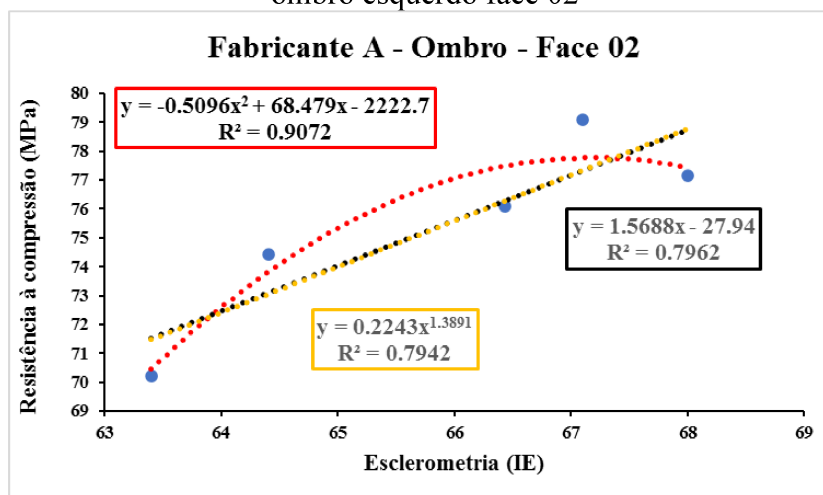


Figura 186: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – ombro esquerdo face 02

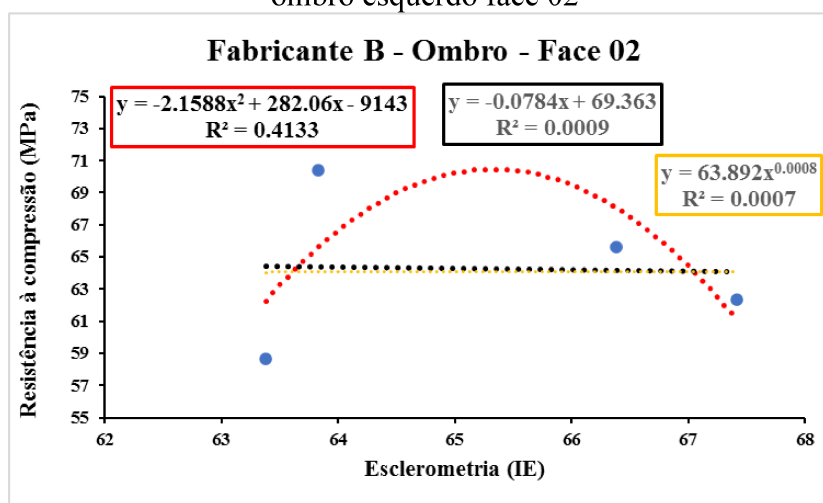


Figura 187: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – centro face 01

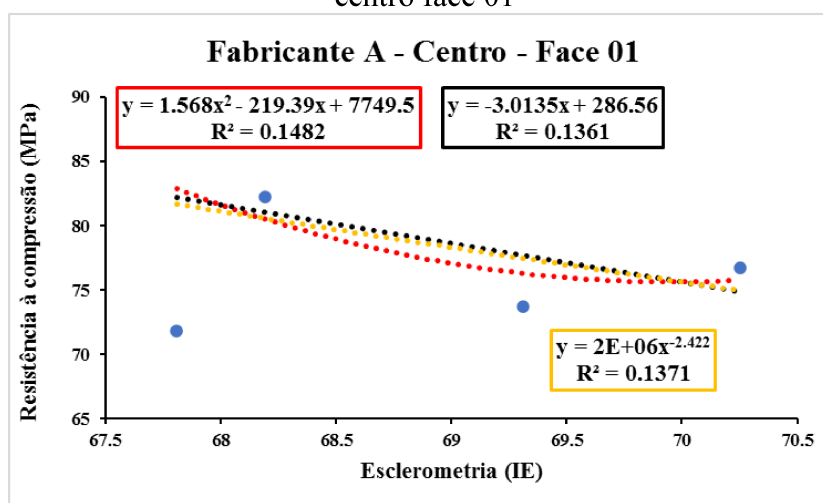


Figura 188: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – centro face 01

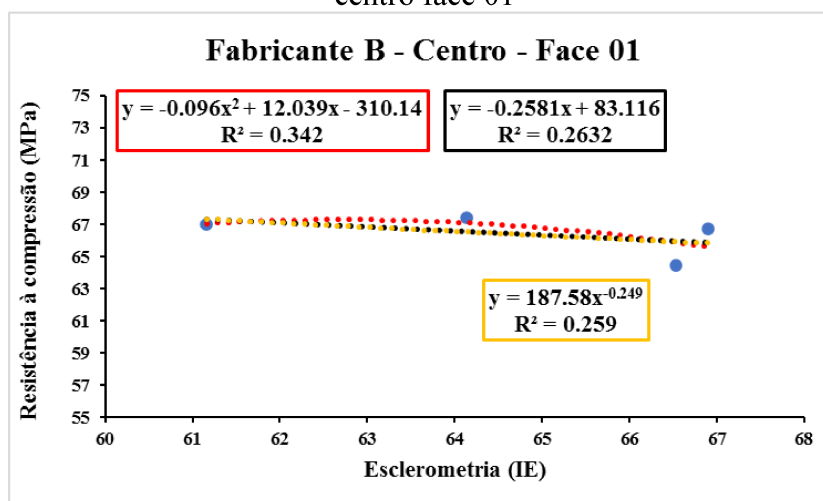


Figura 189: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante A – centro face 02

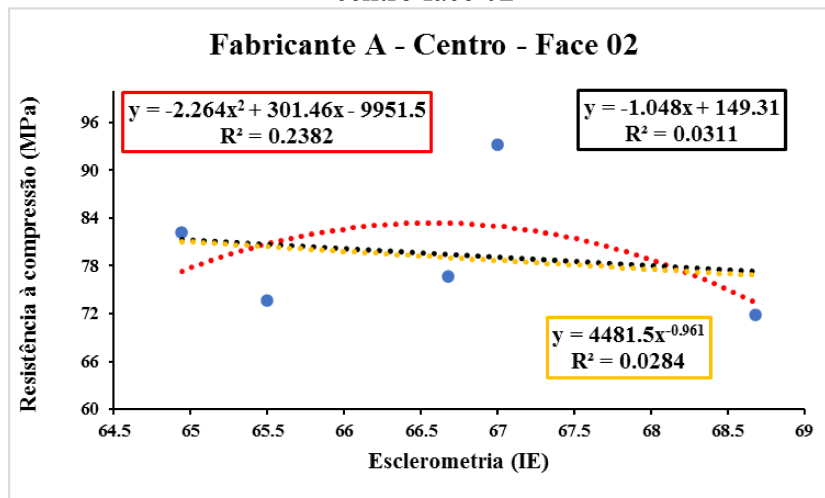
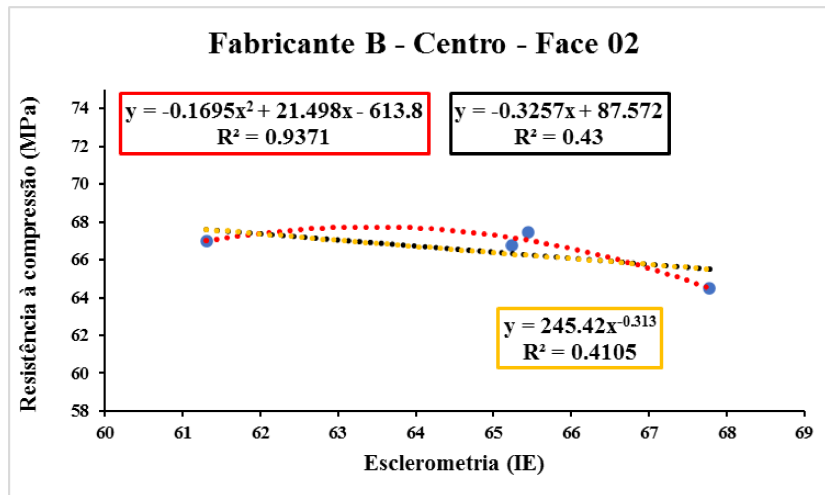


Figura 190: Correlação entre Resistência à compressão e esclerometria – Fabricante B – centro face 02



5.3.2 Correlação entre resistência à compressão e velocidade de ultrassom (direto e indireto)

Do mesmo modo, as curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples, conforme a tabela 29 e gráficos das figuras 183 à 190. Assim, observa-se que a regressão polinomial de segundo grau apresentou maiores valores em relação às demais, mas, porém, muito baixo do esperado para uma curva de correlação mínima aceitável ($R^2 \geq 60\%$). Por outra, no caso em que se tem $R^2=95\%$, a curva não apresentou comportamento semelhante à de outros autores que em seus estudos apontam a existência de proporcionalidade direta entre a resistência à compressão e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (HOBBS; KEBIR, 2007; TRTNIK *et al.*, 2009; SABBAG; UYANAK, 2017).

Tabela 29. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e velocidade de ultrassom (direto e indireto)

Fabricante	Face	Região	Tipo de regressão					
			Linear		Pol. 2º grau		Potência	
			Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
A	01-03	Ombro	$y = -2,3599x + 86,95$	$R^2 = 0,0339$	$y = -40,565x^2 + 387,72x - 848,3$	$R^2 = 0,4244$	$y = 95,146x^{-0,147}$	$R^2 = 0,0287$
		Centro	$y = 36,246x - 99,427$	$R^2 = 0,6129$	$y = 150,26x^2 - 1434,3x + 3494,2$	$R^2 = 0,9446$	$y = 2,6701x^{2,1234}$	$R^2 = 0,6312$
	02	Indireto	$y = 7,0666x + 52,602$	$R^2 = 0,0515$	$y = -21,594x^2 + 171,39x - 258,7$	$R^2 = 0,0844$	$y = 48,31x^{0,3698}$	$R^2 = 0,0533$
B	01-03	Ombro	$y = -2,6582x + 77,327$	$R^2 = 0,0212$	$y = 82,193x^2 - 790,1x + 1957,3$	$R^2 = 0,0986$	$y = 91,165x^{-0,221}$	$R^2 = 0,0218$
		Centro	$y = -2,8932x + 80,65$	$R^2 = 0,2687$	$y = -11,757x^2 + 109,95x - 189,47$	$R^2 = 0,2714$	$y = 92,674x^{-0,209}$	$R^2 = 0,2686$
	02	Indireto	$y = -1,2971x + 71,079$	$R^2 = 0,0843$	$y = 11,183x^2 - 81,708x + 214,88$	$R^2 = 0,2797$	$y = 72,91x^{-0,073}$	$R^2 = 0,0906$

Figura 191: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante A – ombro esquerdo face 01-03

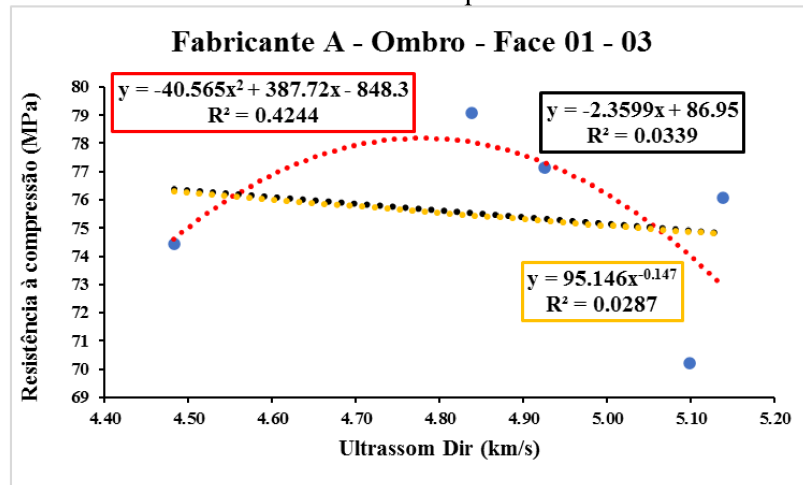


Figura 192: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante B – ombro esquerdo face 01-03

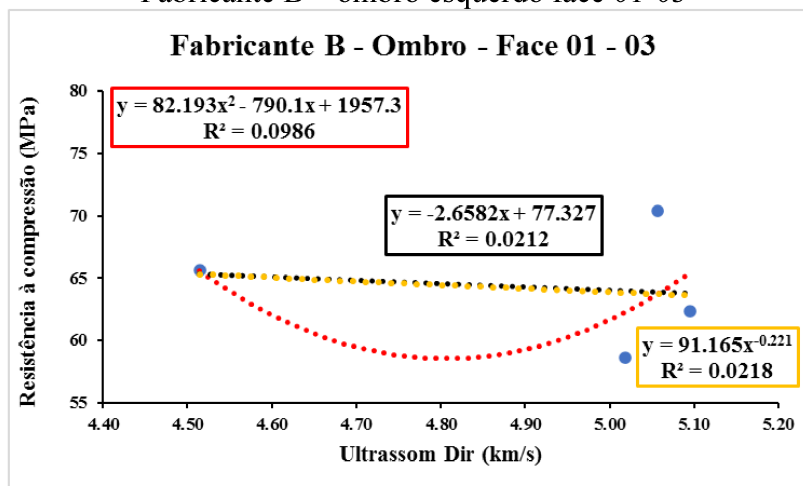


Figura 193: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante A – centro face 01-03

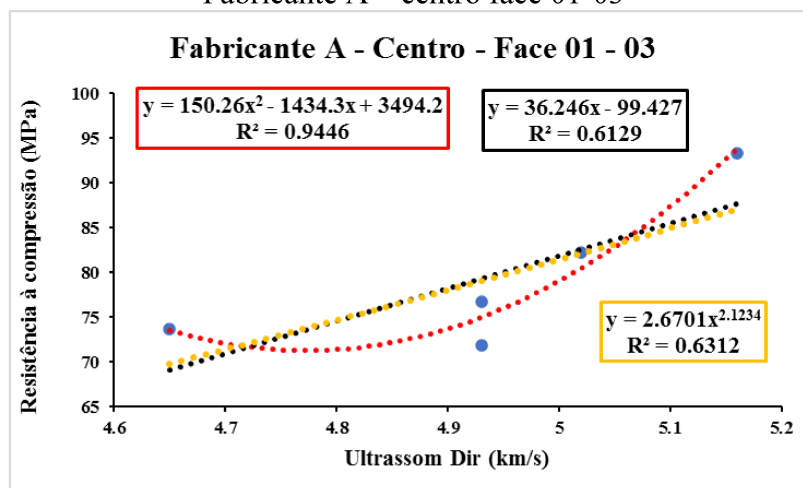


Figura 194: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante B – centro face 01-03

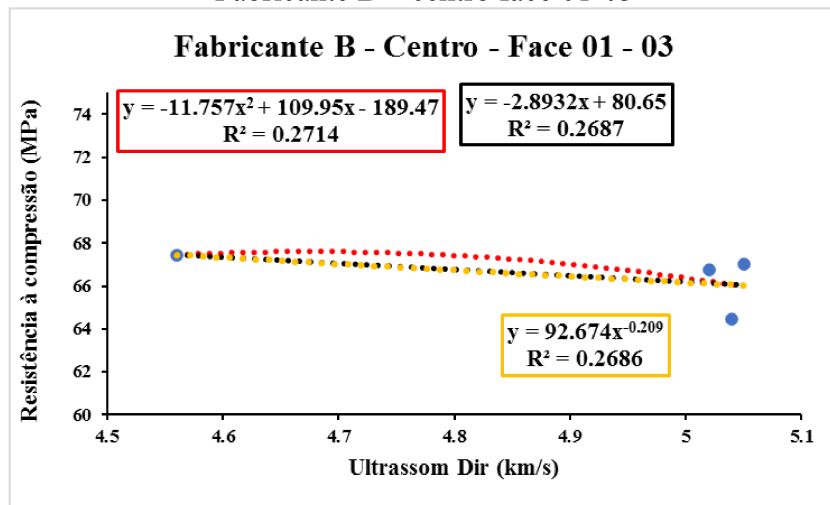


Figura 195: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante A – modo indireto face 2

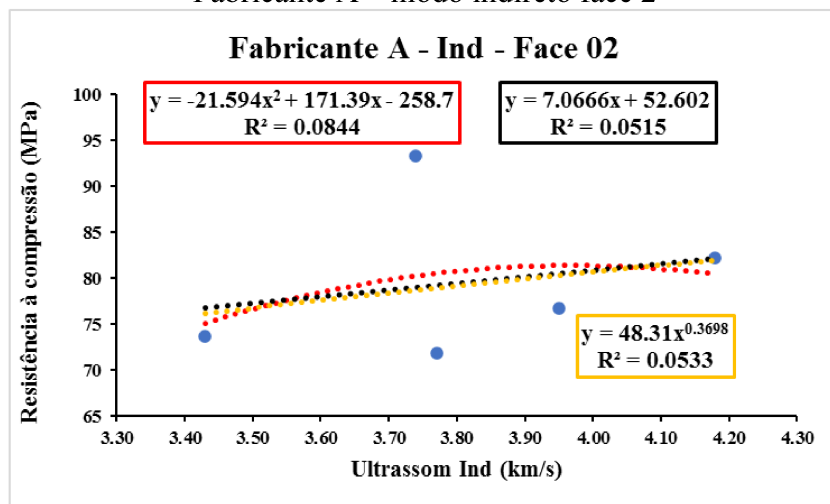
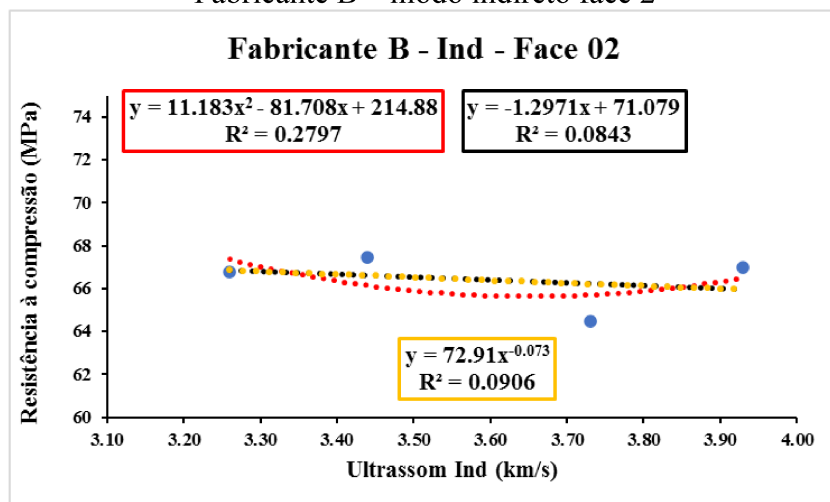


Figura 196: Correlação entre Resistência à compressão e Velocidade de ultrassom – Fabricante B – modo indireto face 2



5.3.3 Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom (direto e indireto)

As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples, conforme a tabela 30 e gráficos das figuras 197 à 202. Assim, observa-se que a regressão polinomial de segundo grau apresentou maiores valores em relação às demais. Vale ressaltar que existe uma relação inversa entre a porosidade e o valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas. A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas diminui à medida que a porosidade aumenta (ISAIAS et al., 2011; WANG et al., 2017; SAHA et al., 2021). Deste modo, as curvas apresentadas nas figuras 198, 200 e 202, apesar de ter um coeficiente de determinação superior à 50%, não representa o comportamento satisfatório.

Tabela 30. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre índice de vazios e velocidade de ultrassom (direto e indireto)

Fabricante	Face	Região	Tipo de regressão					
			Linear		Pol. 2º grau		Potência	
			Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
A	01-03	Ombro	$y = -5,6636x + 36,277$	$R^2 = 0,8171$	$y = -1,502x^2 + 8,7805x + 1,6468$	$R^2 = 0,8194$	$y = 1114,2x^{-3,077}$	$R^2 = 0,8062$
		Centro	$y = -9,148x + 53,573$	$R^2 = 0,9239$	$y = -3,9191x^2 + 29,208x - 40,157$	$R^2 = 0,9292$	$y = 36093x^{-5,252}$	$R^2 = 0,8965$
	02	Indireto	$y = -4,2643x + 24,664$	$R^2 = 0,4436$	$y = 6,4948x^2 - 53,689x + 118,29$	$R^2 = 0,5142$	$y = 95,039x^{-1,829}$	$R^2 = 0,4771$
B	01-03	Ombro	$y = 2,7967x - 3,8664$	$R^2 = 0,4307$	$y = 51,775x^2 - 493,22x + 1180,4$	$R^2 = 0,9948$	$y = 1,1646x^{1,3406}$	$R^2 = 0,4329$
		Centro	$y = 4,0012x - 9,3758$	$R^2 = 0,2229$	$y = -303,33x^2 + 2915,5x - 6978,4$	$R^2 = 0,999$	$y = 0,5159x^{1,8722}$	$R^2 = 0,221$
	02	Indireto	$y = -4,2686x + 25,624$	$R^2 = 0,3958$	$y = 14,54x^2 - 108,81x + 212,58$	$R^2 = 0,539$	$y = 59,773x^{-1,389}$	$R^2 = 0,4259$

Figura 197: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante A – ombro esquerdo face 01-03

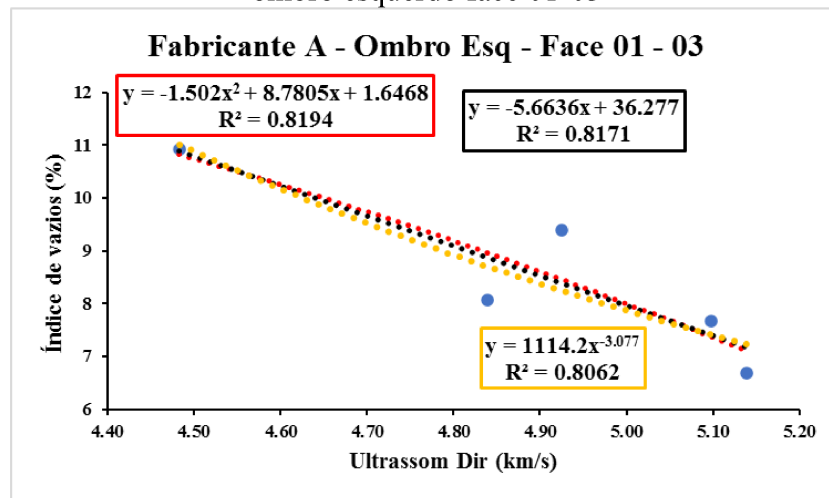


Figura 198: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante B – ombro esquerdo face 01-03

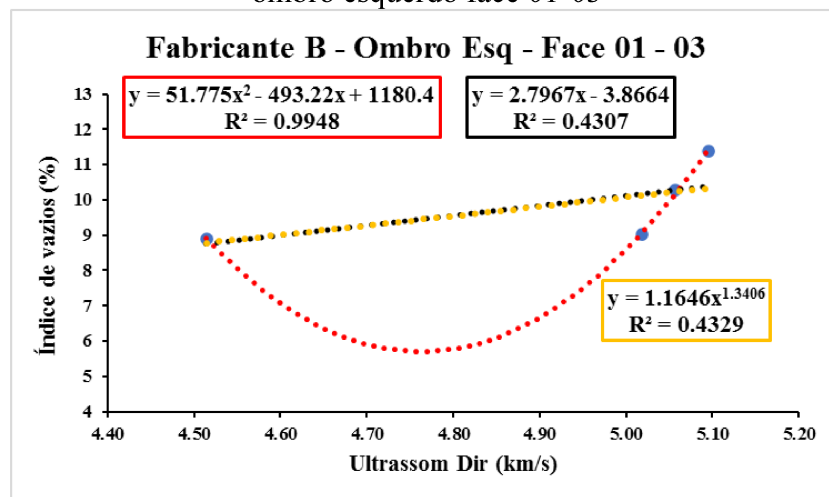


Figura 199: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante A – centro face 01-03

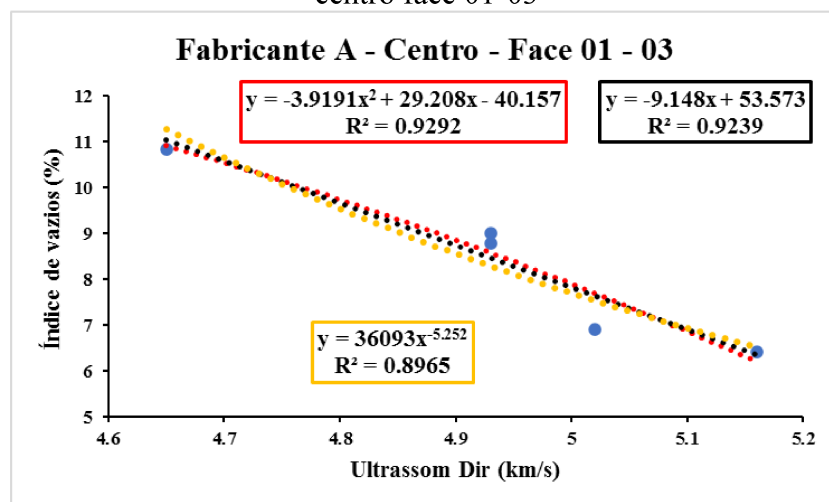


Figura 200: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante B – centro face 01-03

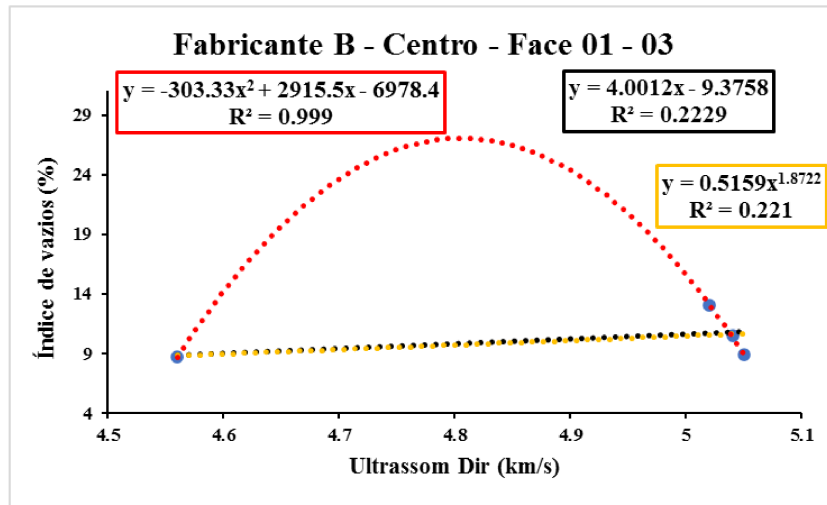


Figura 201: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante A – indireto face 02

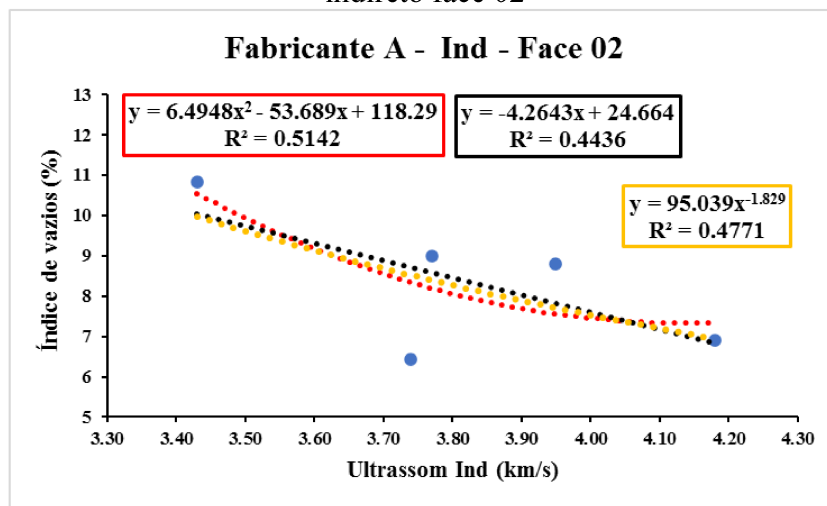
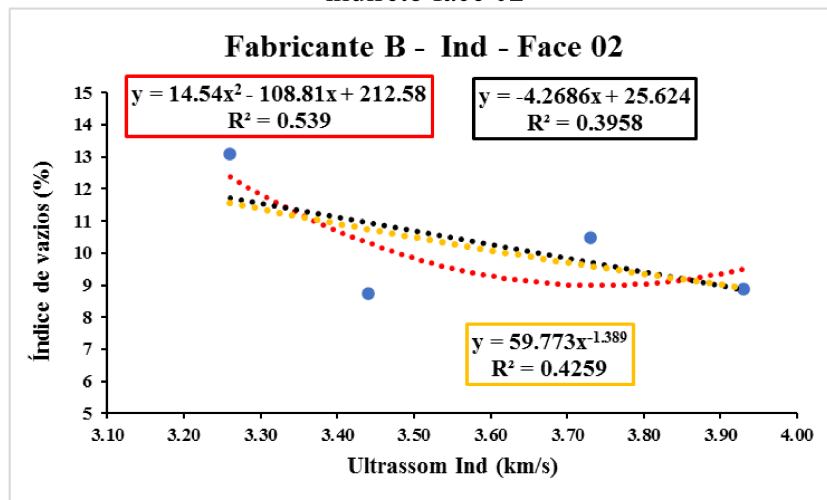


Figura 202: Correlação entre índice de vazios e velocidade de ultrassom – Fabricante B – indireto face 02



5.3.4 Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico por ultrassom

As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples, conforme a tabela 31 e gráficos das figuras 203 à 206. Observa-se mais uma vez que a regressão polinomial de segundo grau apresentou maiores valores em relação às demais. Mas ainda assim, as curvas não representam o comportamento típico semelhante a de outros autores em que se tem uma relação direta entre o módulo dinâmico e a resistência à compressão (LEE et al., 2017; BOLBOREA et al., 2021).

Tabela 31. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e módulo dinâmico por ultrassom

Fabricante	Face	Região	Tipo de regressão					
			Linear		Pol. 2º grau		Potência	
			Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
A	01	Ombro	$y = 1,3929x + 7,624$	$R^2 = 0,2118$	$y = 0,8688x^2 - 83,037x + 2058$	$R^2 = 0,2858$	$y = 2,4213x^{0,8849}$	$R^2 = 0,2115$
		Centro	$y = -3,6345x + 259,7$	$R^2 = 0,203$	$y = -7,5766x^2 + 748,14x - 18382$	$R^2 = 0,5396$	$y = 375616x^{-2,169}$	$R^2 = 0,1925$
B	01	Ombro	$y = -1,2092x + 126,71$	$R^2 = 0,8858$	$y = 0,0523x^2 - 6,6594x + 268,24$	$R^2 = 0,8918$	$y = 3120,7x^{-0,985}$	$R^2 = 0,8903$
		Centro	$y = -0,322x + 82,778$	$R^2 = 0,4056$	$y = -0,4493x^2 + 45,302x - 1073,1$	$R^2 = 0,8449$	$y = 174,74x^{-0,246}$	$R^2 = 0,3979$

Figura 203: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante A – ombro esquerdo face 01-03

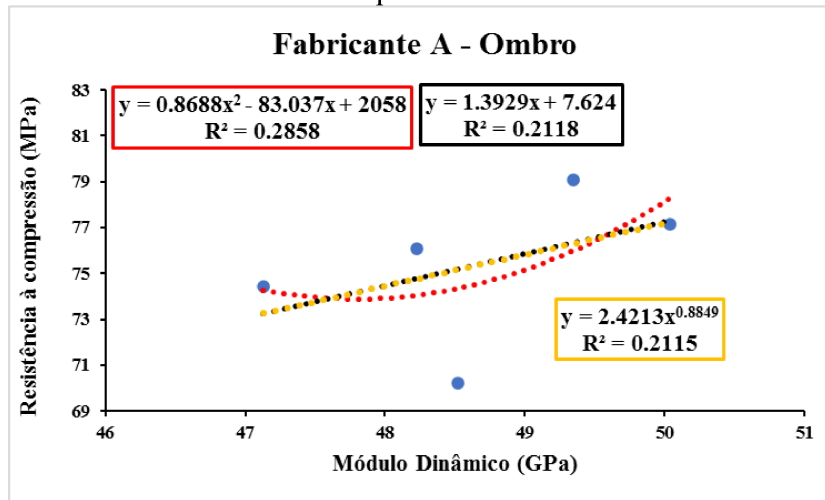


Figura 204: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante B – ombro esquerdo face 01-03

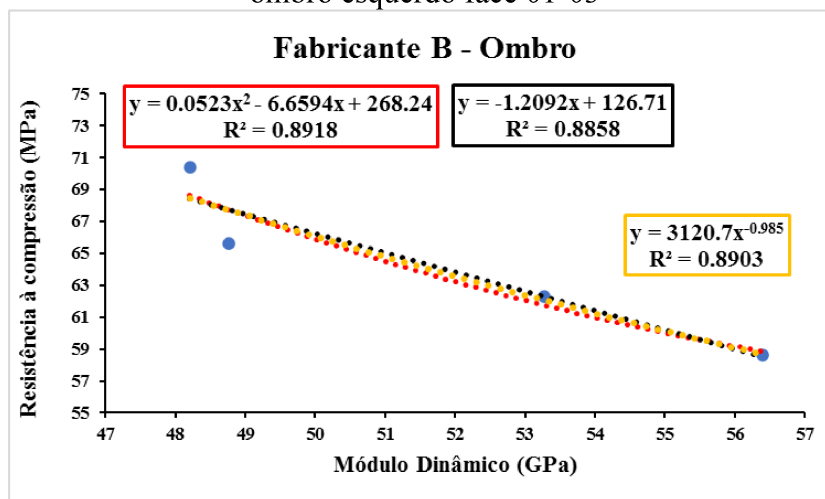


Figura 205: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante A – centro face 01-03

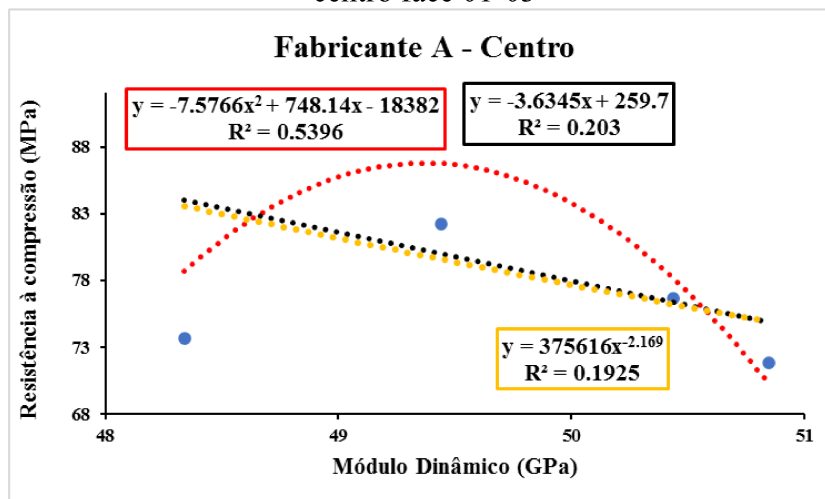
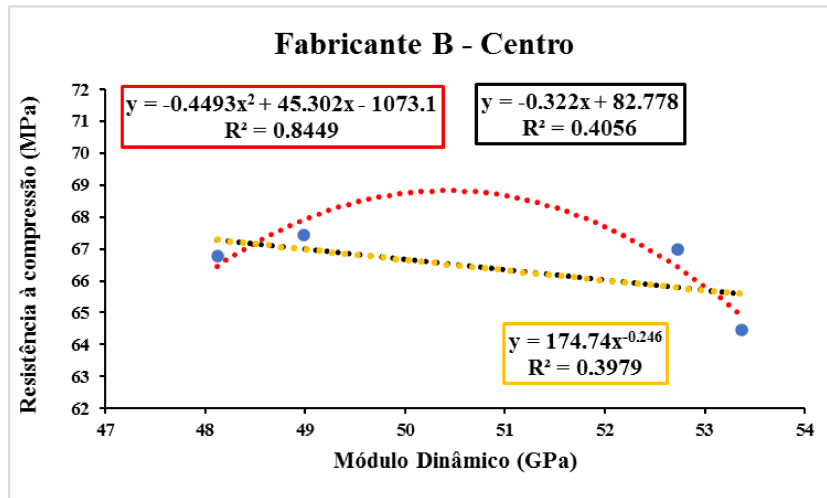


Figura 206: Correlação entre resistência à compressão e módulo dinâmico – Fabricante B – centro face 01-03



5.3.5 Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial

As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples, conforme a tabela 32 e gráficos das figuras 207 à 214. Observa-se mais uma vez que a regressão polinomial de segundo grau apresentou maiores valores em relação às demais. Mas ainda assim, as curvas não representam o comportamento típico semelhante a outros autores em que se tem uma relação direta entre a resistividade elétrica superficial e a resistência à compressão (METHA E MONTEIRO, 2014; MEDEIROS-JUNIOR et al., 2019).

Tabela 32. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre resistência à compressão e resistividade elétrica superficial

Fabricante	Face	Região	Tipo de regressão					
			Linear		Pol. 2º grau		Potência	
			Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
A	01	Ombro	$y = -0,6089x + 95,55$	$R^2 = 0,2801$	$y = 0,2514x^2 - 16,622x + 348,4$	$R^2 = 0,4137$	$y = 186,98x^{-0,26}$	$R^2 = 0,2924$
		Centro	$y = 0,279x + 70,179$	$R^2 = 0,0134$	$y = -0,4463x^2 + 28,444x - 367,76$	$R^2 = 0,1404$	$y = 56,14x^{0,098}$	$R^2 = 0,0155$
	02	Ombro	$y = -0,3136x + 85,179$	$R^2 = 0,267$	$y = 0,0447x^2 - 3,014x + 124,81$	$R^2 = 0,3149$	$y = 116,58x^{-0,127}$	$R^2 = 0,2805$
		Centro	$y = 0,2983x + 69,739$	$R^2 = 0,0154$	$y = -0,1597x^2 + 10,536x - 92,595$	$R^2 = 0,0532$	$y = 52,118x^{0,1199}$	$R^2 = 0,0173$
B	01	Ombro	$y = 1,1864x + 23,27$	$R^2 = 0,1822$	$y = -2,4717x^2 + 172,03x - 2922,8$	$R^2 = 0,9613$	$y = 6,0196x^{0,668}$	$R^2 = 0,1858$
		Centro	$y = -0,2253x + 73,972$	$R^2 = 0,4298$	$y = -0,0727x^2 + 4,6051x - 5,4672$	$R^2 = 0,7986$	$y = 97,278x^{-0,109}$	$R^2 = 0,3927$
	02	Ombro	$y = 1,2911x + 22,763$	$R^2 = 0,7695$	$y = 0,4345x^2 - 25,394x + 427,85$	$R^2 = 0,9784$	$y = 7,6508x^{0,6134}$	$R^2 = 0,7619$
		Centro	$y = -0,1456x + 71,262$	$R^2 = 0,0408$	$y = 1,8853x^2 - 122,05x + 2035,6$	$R^2 = 0,8746$	$y = 85,942x^{-0,074}$	$R^2 = 0,0429$

Figura 207: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 01

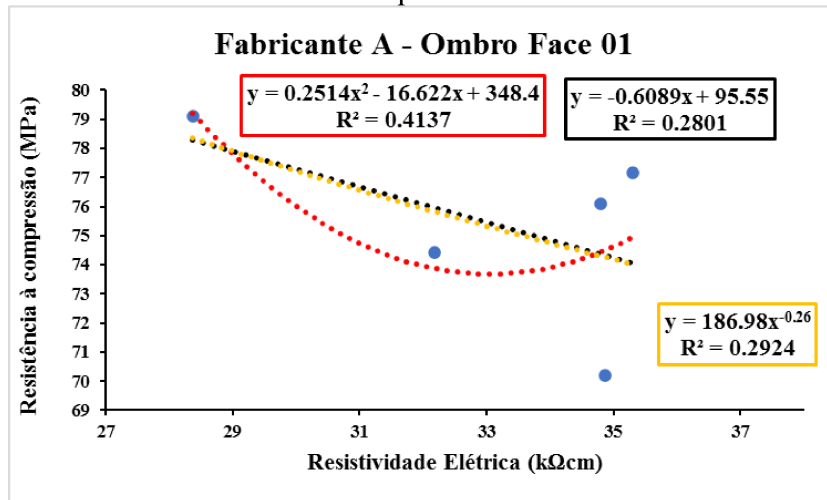


Figura 208: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 01

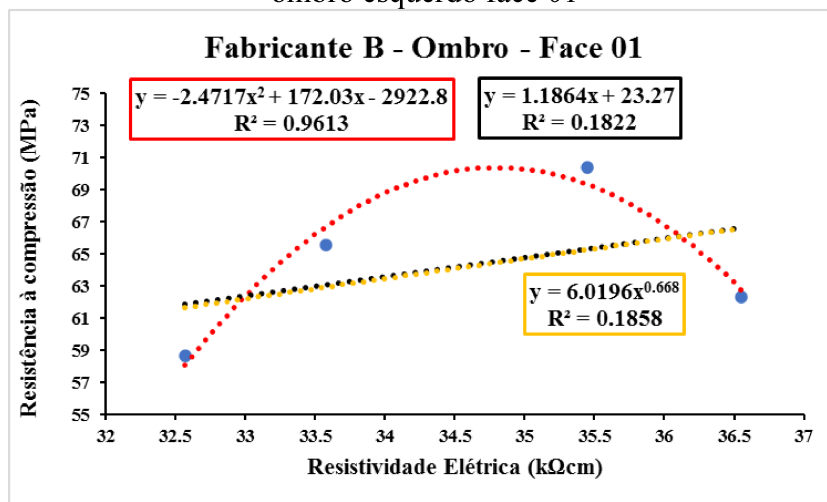


Figura 209: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 02

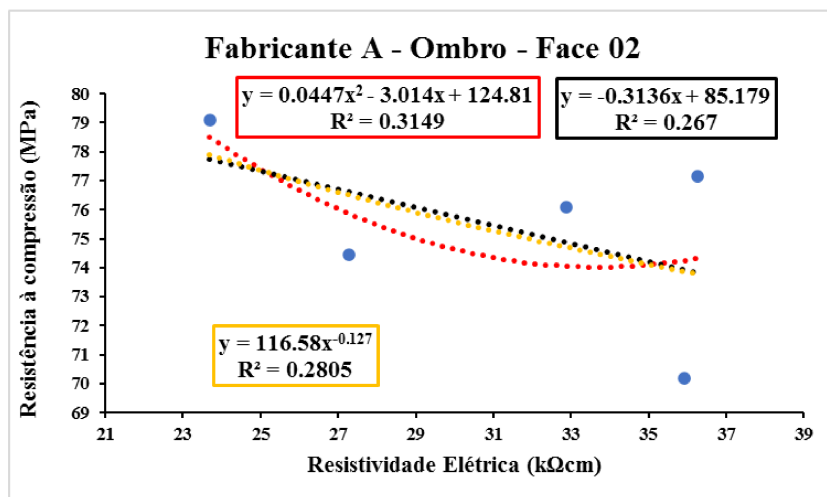


Figura 210: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 02

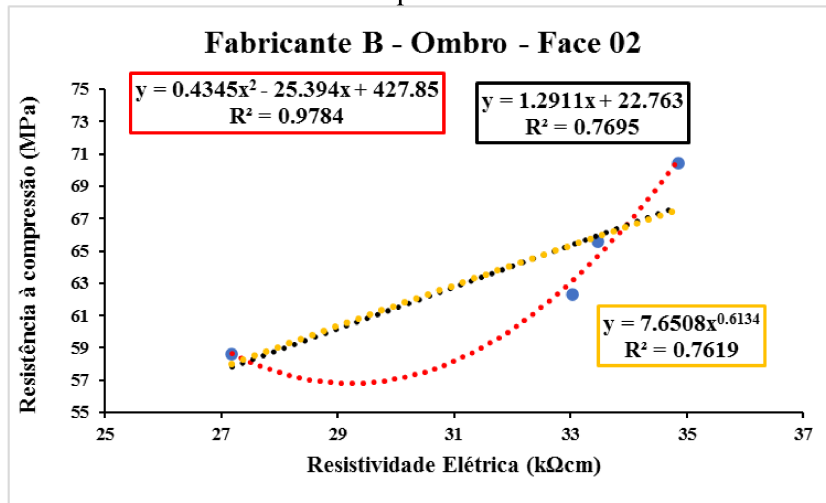


Figura 211: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 01

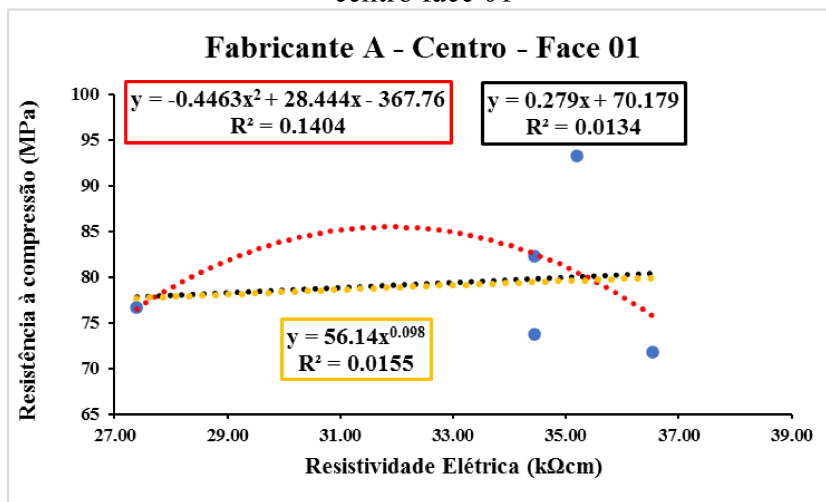


Figura 212: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 01

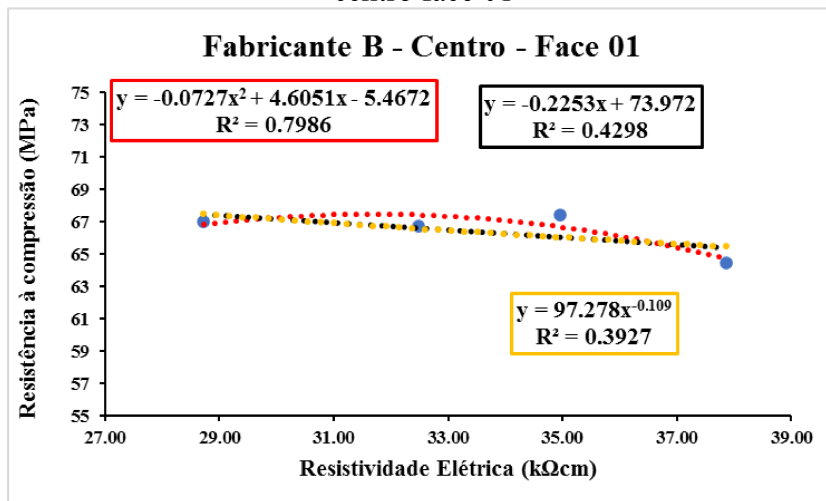


Figura 213: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 02

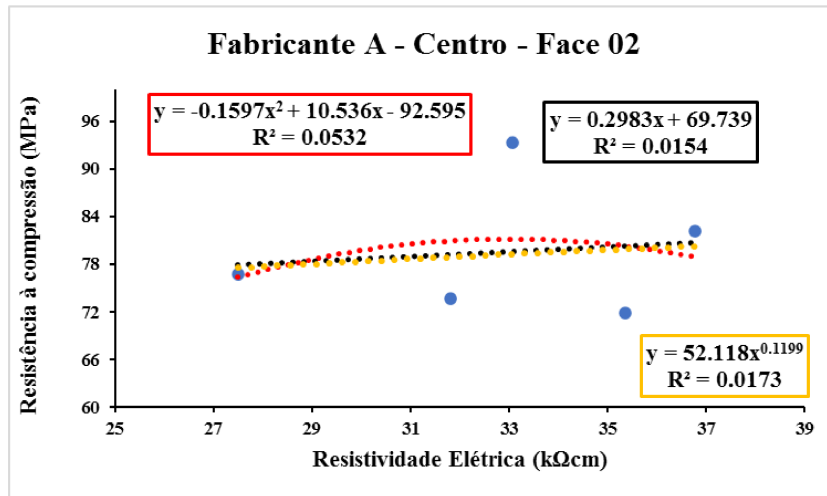
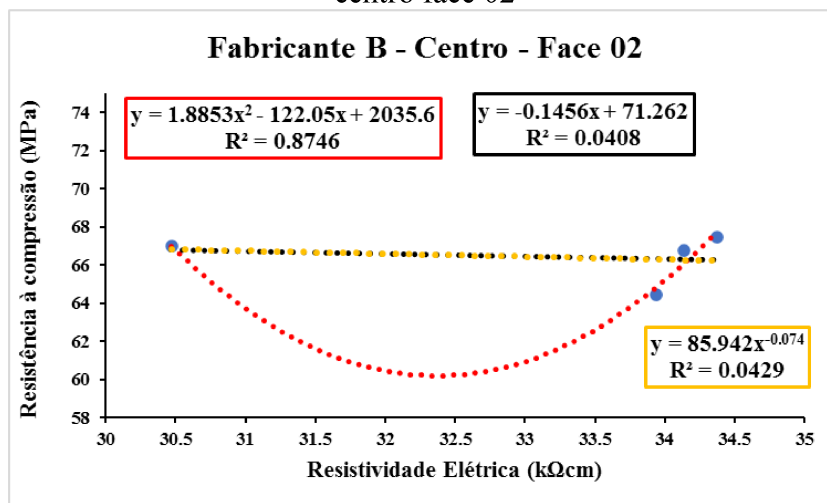


Figura 214: Correlação entre resistência à compressão e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 02



5.3.6 Correlação entre absorção capilar e resistividade elétrica superficial

As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples, conforme a tabela 33 e gráficos das figuras 215 à 222. Observa-se uma vez que a regressão polinomial de segundo grau apresentou maiores valores em relação às demais. As curvas não representam o comportamento típico semelhante a outros autores em que se tem uma relação inversa entre a resistividade elétrica superficial e a absorção por capilaridade (METHA E MONTEIRO, 2014; AZARSA; GUPTA, 2017; DEMIRCILIOGLU et al., 2019).

Tabela 33. Coeficiente R^2 das regressões testadas para correlações entre absorção capilar e resistividade elétrica superficial

Fabricante	Face	Região	Tipo de regressão					
			Linear		Pol. 2º grau		Potência	
			Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
A	01	Ombro	$y = 0.0002x - 0.0032$	$R^2 = 0.2221$	$y = -1E-06x^2 + 0.0002x - 0.0043$	$R^2 = 0.2221$	$y = 2E-06x^{2.0526}$	$R^2 = 0.2218$
		Centro	$y = 0.0001x - 0.0023$	$R^2 = 0.2854$	$y = 8E-05x^2 - 0.0051x + 0.079$	$R^2 = 0.6932$	$y = 6E-06x^{1.6688}$	$R^2 = 0.2992$
	02	Ombro	$y = 0.0001x - 0.0006$	$R^2 = 0.2661$	$y = 2E-05x^2 - 0.0009x + 0.0135$	$R^2 = 0.323$	$y = 6E-05x^{1.0733}$	$R^2 = 0.2669$
		Centro	$y = 0.0001x - 0.0014$	$R^2 = 0.1876$	$y = -8E-06x^2 + 0.0006x - 0.0093$	$R^2 = 0.196$	$y = 1E-05x^{1.4479}$	$R^2 = 0.186$
B	01	Ombro	$y = 0.0005x - 0.0133$	$R^2 = 0.8836$	$y = -8E-05x^2 + 0.0062x - 0.1118$	$R^2 = 0.9093$	$y = 2E-11x^{5.3818}$	$R^2 = 0.8627$
		Centro	$y = 0.0002x - 0.0034$	$R^2 = 0.7373$	$y = -1E-05x^2 + 0.0011x - 0.0187$	$R^2 = 0.7646$	$y = 2E-06x^{2.1033}$	$R^2 = 0.7223$
	02	Ombro	$y = 0.0002x - 0.0038$	$R^2 = 0.6726$	$y = -7E-05x^2 + 0.0043x - 0.0653$	$R^2 = 0.8151$	$y = 7E-07x^{2.4254}$	$R^2 = 0.6494$
		Centro	$y = 0.0004x - 0.0105$	$R^2 = 0.6904$	$y = -0.0008x^2 + 0.0532x - 0.8612$	$R^2 = 0.9998$	$y = 8E-10x^{4.3585}$	$R^2 = 0.6729$

Figura 215: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 01

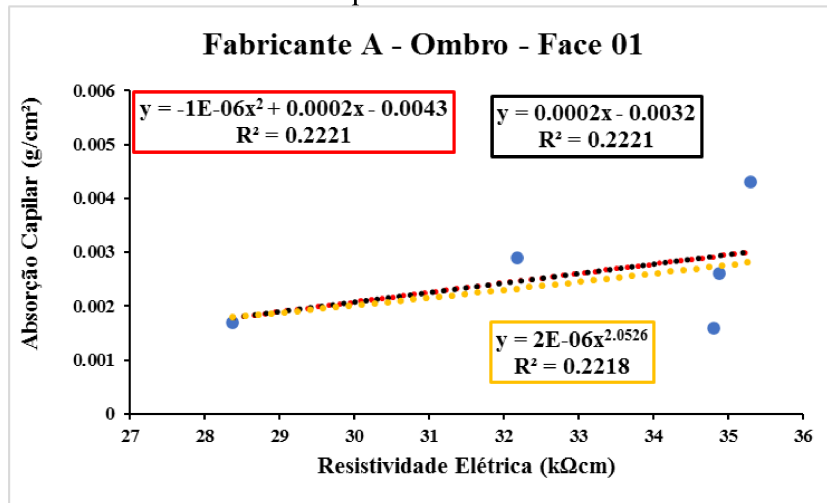


Figura 216: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 01

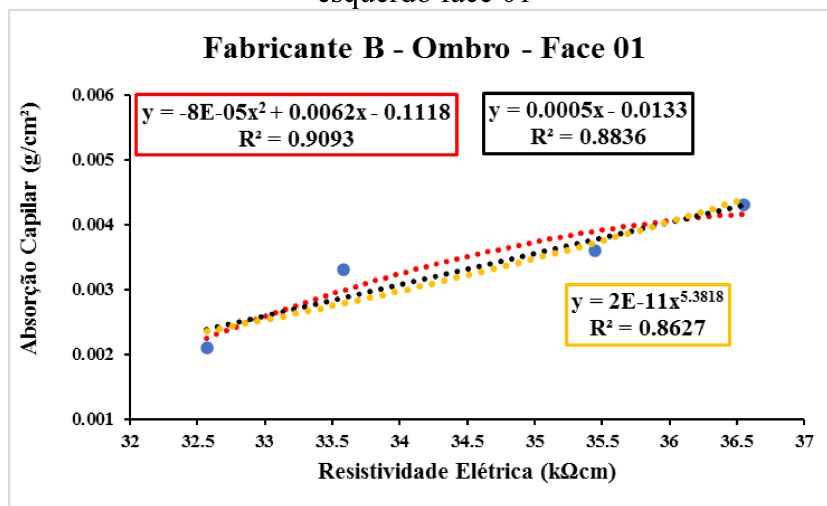


Figura 217: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – ombro esquerdo face 02

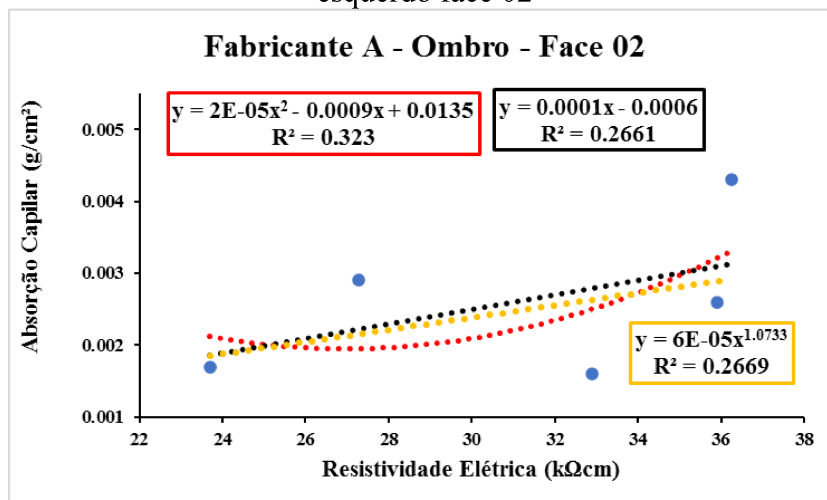


Figura 218: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – ombro esquerdo face 02

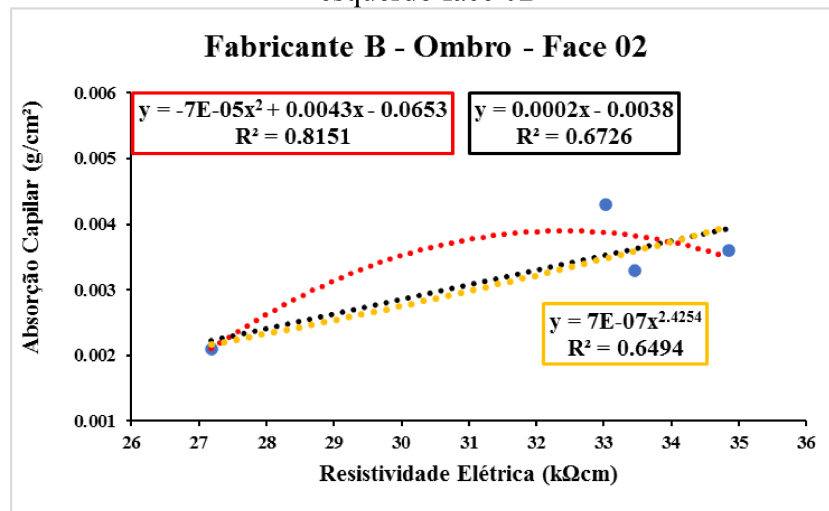


Figura 219: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 01

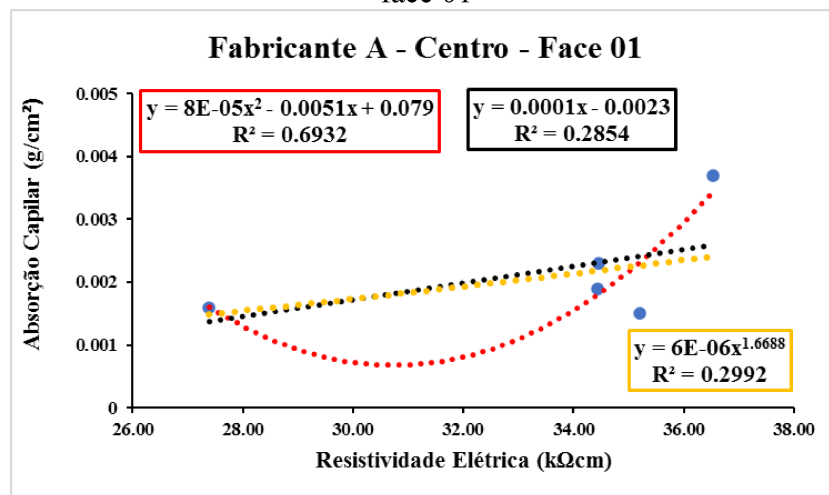


Figura 220: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 01

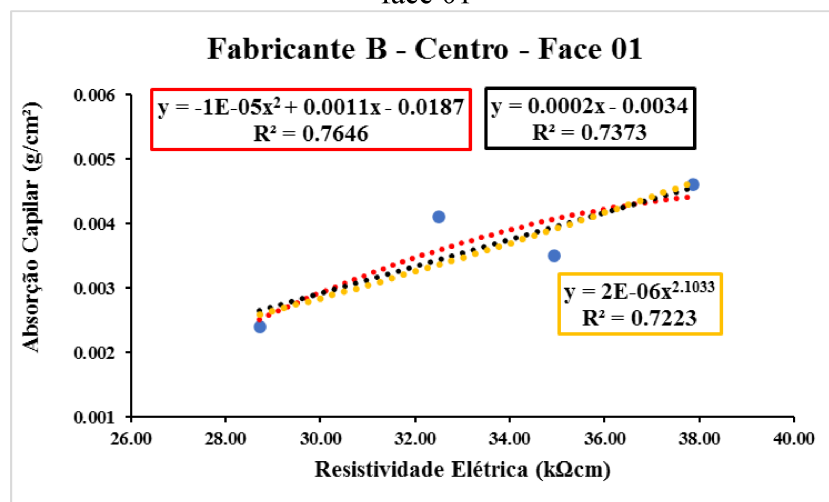


Figura 221: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante A – centro face 02

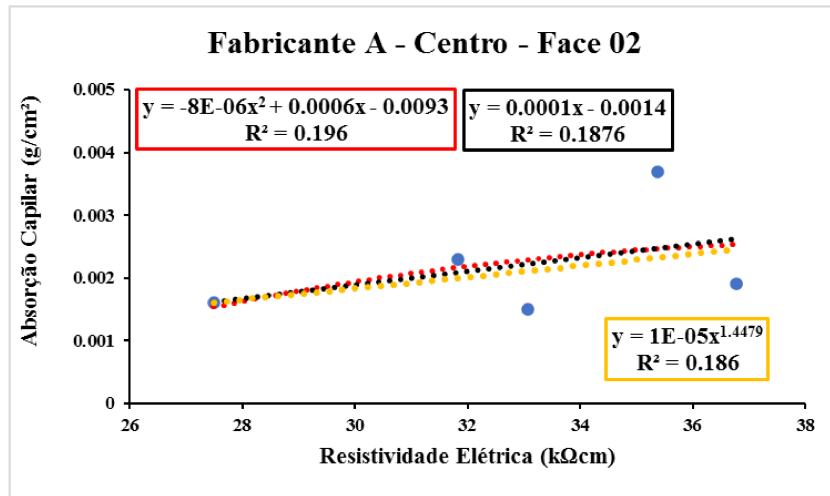
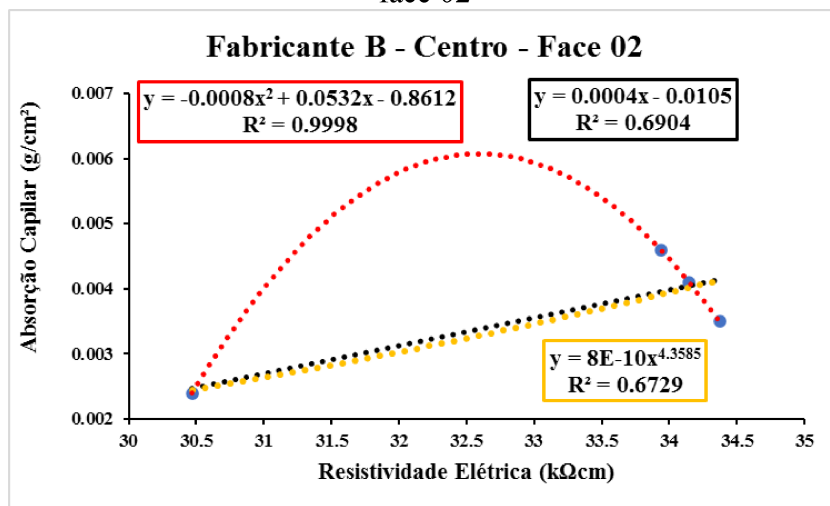


Figura 222: Correlação entre Absorção capilar e resistividade elétrica – Fabricante B – centro face 02



6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa buscou avaliar a possibilidade do uso de ensaios não destrutivos na inspeção de dormentes de concreto protendido através do estabelecimento de correlações obtidas da combinação de varias técnicas com as propriedades físicas e mecânicas do concreto dos dormentes de 9 grupos e dois fabricantes.

Ao analisar os ensaios não destrutivos individualmente, percebe-se que para o ensaio de esclerometria, os valores medidos de índice esclerométrico das faces laterais do dormente (face 01 e 03) são significativamente diferentes da face 2. Isso porque possivelmente a forma como os dormentes são acomodados na ferrovia pode de certo modo originar variação da uniformidade da camada superficial dos dormentes. Por outra, devido ao fato da face superior do dormente ser diferente das outras devido à moldagem e possuir área disponível para realização do teste inferior comparando com as superfícies laterais. Os maiores valores de índice esclerométrico foram registados na região central do dormente. De maneira geral as variáveis cidade de fabricação, ano de fabricação e condição de uso, não foi possível observar as suas influências nos resultados. Os resultados da região dos ombros mostram que a resistência a compressão aumenta com o aumento do valor do índice esclerométrico, enquanto que para a região do centro a relação não foi diretamente proporcional.

Para o ensaio de velocidade de ultrassom, percebe-se que em ambos fabricantes, os grupos de dormentes apresentaram valores de velocidades de onda ultrassônica superiores à 4000 m/s. podendo ser classificado como sendo de boa qualidade. A região dos ombros apresenta valores mais baixos em relação ao centro. Os resultados da leitura da velocidade de ultrassom no modo indireto foram cerca de 15% menor do que a obtida no modo de transmissão direta. Não houve uma relação direta entre os resultados da velocidade de ultrassom e índice de vazios com a resistência à compressão. No ensaio de módulo dinâmico por ultrassom, observa-se que de maneira geral todos os grupos apresentaram resultados à 40 GPa, conforme se espera de um concreto de resistência à compressão de 45 MPa. Os resultados não mostraram não mostraram relação direta com a resistência à compressão para ambos fabricantes.

Para o resultado de resistividade elétrica superficial, observa-se que todos os grupos apresentaram valores de resistividade elétrica superiores a 20 kΩcm e grandes variações entre os resultados (desvio padrão). Indicando uma probabilidade insignificante para a corrosão das armaduras. Os resultados do fabricante B mostraram relação direta com a resistência à compressão, enquanto que para o fabricante A não foi possível observar relação de proporcionalidade.

Para o ensaio de potencial de corrosão, os dormentes de todos os grupos não apresentaram risco de corrosão da armadura. Os grupos 1 e 2 que pertencem ao fabricante A e que tem maior tempo de exposição na ferrovia, apresentaram potenciais mais negativos e incerteza de ocorrência de corrosão. O ensaio de tomografia não foi muito preciso na localização de descontinuidade, dos dormentes de cada grupo. O ensaio de GPR não apresentou semelhança de resultados com a tomografia. Assim, mostrou não ser o mais indicado para inspeção em dormentes.

As curvas de correlação foram traçadas através de regressão simples. Foram testados diferentes tipos de regressões tais como: linear, polinomial e de potência. Em todos ensaios, a curva que melhor se ajustou em função do coeficiente de determinação R^2 , foi a polinomial de segundo grau, pois, apresentou maiores valores em relação às demais. Ainda assim, as curvas de correlação encontradas não foram semelhantes a apresentados por diversos autores.

REFERÊNCIAS

- ABDELHAMEED, Eman et al. Railway Inspection using Non-Contact Non-Destructive Techniques. **International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)** ISSN: 2394-3661, Volume-7, Issue-8, August 2020. <https://doi.org/10.31873/IJEAS.7.08.13>
- ABRAHAM, Bini; MATHEW, Jeena. A Review on Durability Assessment of Concrete Structures Using Electrical Resistivity Method. *International Journal Of Research In Engineering And Science (Ijres)*, Ernakulum, Kerala, India, v. 9, n. 2320-9364, p. 12-19, jul. 2021. www.ijres.org.
- AELA, Peyman et al. **Numerical and Experimental Analysis of Lateral Resistance of Single Y-Shaped Steel Sleeper on Ballasted Tracks**. *Journal Of Materials In Civil Engineering*, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 1-6, jan. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004064](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004064).
- AGGELIS, D.G. et al. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 24, n. 10, p. 1888-1897, out. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.014>.
- AGGELIS, D.G. et al. NDT approach for characterization of subsurface cracks in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 25, n. 7, p. 3089-3097, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.045>.
- ALEXANDER, Mark et al. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 122, p. 17-29, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>.
- ALHAJJ, Marie Antoinette et al. Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 223, p. 898-909, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.208>.
- AL-HURI, Mohammed et al. **Evaluation of Compressive Strength of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Using Non-Destructive Tests**. *Arabian Journal For Science And Engineering*, [S.L.], v. 47, n. 4, p. 5395-5409, 25 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-021-06448-z>.
- ALMASAEID, Hatem H. et al. Assessment of high-temperature damaged concrete using non-destructive tests and artificial neural network modelling. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 16, p. 1-16, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01080>.
- AL-MUFTI, R. Latif; FRIED, A.N. The early age non-destructive testing of concrete made with recycled concrete aggregate. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 37, p. 379-386, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.058>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**. United States, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS **ASTM G57: Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method**. United States, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C876: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete**. United States, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D2845: **Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock (Withdrawn 2017)**. United States, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 805: **Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete**. United States, 2018.

ARTAGAN, Salih Serkan et al. **Non-destructive Assessment and Health Monitoring of Railway Infrastructures**. *Surveys In Geophysics*, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 447-483, 1 jul. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-019-09544-w>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 11709. **Dormente de concreto - Projeto, materiais e componentes**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8802. **Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8953. **Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção da água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7680 – 1: **Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – parte 1: Resistência a compressão axial**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584: **Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerometro de reflexão -método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.

AWOYERA, Paul O. *et al.* Modeling Temperature of Fire-Damaged Reinforced Concrete Buildings Based on Nondestructive Testing and Gene Algorithm Techniques. **Fire Technology**, [S.L.], v. 58, n. 2, p. 941-957, 5 out. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-021-01182-2>.

AZARSA, Pejman; GUPTA, Rishi. Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: a review. **Advances In Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 2017, p. 1-30, 2017. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/8453095>.

BABAEI, Mahdi et al. Passivity of embedded reinforcement in carbonated low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 85, p. 32-43, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.001>.

BAEHAKI et al. Experimental study of crack depth measurement of concrete with ultrasonic pulse velocity (UPV). **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 673, n. 1, p. 012047, 1 dez. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/673/1/012047>.

BASTOS, Josué César et al. **Degradation Mechanisms of Concrete Due to Water Flow in Cracks of Prestressed Railroad Sleepers under Cyclic Loading**. Journal Of Materials In Civil Engineering. Reston, p. 1-10. abr. 2022. [doi: 10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004144](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004144).

BASTOS, Josué César et al. Laboratory analysis of track gauge restraining capacity of center-cracked railway concrete sleepers with various support conditions. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 94, p. 354-363, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.08.018>.

BEHNIA, A. et al. Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 67, p. 202-215, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.011>.

BOLBOREA, Bogdan et al. Concrete Compressive Strength by Means of Ultrasonic Pulse Velocity and Moduli of Elasticity. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 22, p. 7018, 19 nov. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14227018>.

BOURREAU, Lucas et al. Uncertainty assessment of concrete electrical resistivity measurements on a coastal bridge. **Structure And Infrastructure Engineering**, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 443-453, 26 jan. 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2018.1557703>.

BRECCOLOTTI, Marco et al. Influence of carbonation depth on concrete strength evaluation carried out using the SonReb method. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 59, p. 96-104, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.06.002>.

BRECCOLOTTI, Marco; BONFIGLI, Massimo F.. I-SonReb: an improved ndt method to evaluate the strength of carbonated concrete. **Nondestructive Testing And Evaluation**, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 327-346, 20 jul. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1046872>.

BRENCICH, Antonio et al. Rebound Hammer Test: an investigation into its reliability in applications on concrete structures. **Advances In Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 2020, p. 1-11, 14 dez. 2020. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2020/6450183>.

BREYSSE, Denys *et al.* Assessing concrete strength with rebound hammer: review of key issues and ideas for more reliable conclusions. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 47, n. 9, p. 1589-1604, 25 jul. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0139-9>.

BROŽOVSKÝ, Jiří. Influence of Moisture and Temperature of Calcium Silicate Bricks on Results of Measurements with Rebound Hammer. **Advanced Materials Research**, [S.L.], v. 1000, p. 352-355, ago. 2014. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1000.352>.

BUI, Phuong Trinh et al. Electrical resistance measurement to assess moisture transfer in cement-based mortar through water absorbing and drying processes. **Proceedings of The Japan Concrete Institute**, v. 38, n. 1, p. 813-818, 2016.

BUNGEY, J. H.; MILLARD, S. G.; GRANTHAM, M. G. **Testing of Concrete in Structures**. 4. ed. New York: Taylor & Francis, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781482264685>

CALLISTER JR., WILLIAM D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, 1a ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002, ISBN: 85-216-2188-5

CAMARGO, Marcos Vinício de; FERRARI, Vladimir José. Resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto por meio de ensaios não destrutivos (END). **Matéria (Rio**

de Janeiro), [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-16, 28 jul. 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13047>.

CAMILLE, Christophe et al. Structural behaviour of prestressed concrete sleepers reinforced with high-performance macro synthetic fibres. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 141, p. 106671, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106671>.

CAMPOS, H.F. *et al.* Proposed mix design method for sustainable high-strength concrete using particle packing optimization. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 265, p. 121907, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121907>.

CASSIANI, Juan Daniel et al. Durability assessment of a tunnel structure with two-sided chloride ingress—A case study located in a tropical environment. **Structural Concrete**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 739-752, 9 dez. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202100550>.

ÇEÇEN, Ferhat; AKTAŞ, Bekir. **Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers**. *Engineering Failure Analysis*, [S.L.], v. 127, p. 105471, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105471>.

CHANSURIYASAK, Kitipoom et al. Comparison between half-cell potential of reinforced concrete exposed to carbon dioxide and chloride environment. **Songklanakarin J. Sci. Technol**, v. 32, n. 5, p. 461-468, 2010.

CHOI, Pangil et al. Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in concrete pavement and bridge. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 121, p. 81-91, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.126>.

CHRISTODOULOU, C. et al. A new arrangement of galvanic anodes for the repair of reinforced concrete structures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 50, p. 300-307, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.062>.

CLEVEN, Simon et al. Electrical Resistivity of Steel Fibre-Reinforced Concrete—Influencing Parameters. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 12, p. 3408, 20 jun. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14123408>.

COCA, FJ Olguín et al. Influence of environmental and electrochemical factors in the durability of concrete. *Portugaliae electrochimica acta*, v. 22, p. 321-334, 2004. <https://doi.org/10.4152/pea.200404321>

COPPIO, Gustavo J.L. *et al.* Surface electrical resistivity and compressive strength of concrete with the use of waste foundry sand as aggregate. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 212, p. 514-521, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.297>.

DEMIRCILIOĞLU, Erman et al. Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 224, p. 420-427, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.091>.

DESHPANDE, Alok A. et al. Influence of high temperatures on the residual mechanical properties of a hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 208, p. 283-295, maio 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.129>.

DIAB, Ahmed M. et al. Effect of nanomaterials additives on performance of concrete resistance against magnesium sulfate and acids. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 210, p. 210-231, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.099>.

DINH, Kien et al. Automated visualization of concrete bridge deck condition from GPR data. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 102, p. 120-128, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.015>.

EL-SAYED, H.M. et al. A review of the structural performance of prestressed monoblock concrete sleepers in ballasted railway tracks. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 140, p. 106522, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106522>.

ESTÉVEZ, Esteban et al. Ultrasonic Pulse Velocity—Compressive Strength Relationship for Portland Cement Mortars Cured at Different Conditions. **Crystals**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 133, 22 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/cryst10020133>.

FERDOUS, Wahid et al. Behaviour of Polymer Filled Composites for Novel Polymer Railway Sleepers. **Polymers**, [S.L.], v. 13, n. 8, p. 1324, 18 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/polym13081324>.

FERDOUS, Wahid et al. Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects. **Composite Structures**, [S.L.], v. 134, p. 158-168, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.058>.

FERDOUS, Wahid et al. Static behaviour of glass fibre reinforced novel composite sleepers for mainline railway track. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 229, p. 111627, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111627>.

FERDOUS, Wahid; MANALO, Allan. Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – Review of current practice. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 44, p. 17-35, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.04.020>.

FERRARI, Vladimir José; MANTOVANI, Jaqueline Vicentini. ESCLEROMETRIA E VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO PULSO ULTRASSÔNICO PARA ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO POR MEIO DE CURVAS DE CORRELAÇÃO. **Revista Tecnológica**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 49-61, 6 jan. 2020. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/revtecnol.v29i1.49939>.

FISK, Paul S.. **Inspection of Concrete Ties Using Sonic/Ultrasonic Impact Velocity and Impact Echo Measurements**. Washington, Dc 20590: U.s. Department Of Transportation Federal Railroad Administration, 2018. 128 p. <http://www.fra.dot.gov>.

FODIL, Narmane et al. The influence of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity measurements in concrete of different strength ranges. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 603, n. 2, p. 022049, 1 set. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/603/2/022049>.

FRANCA, André Stanzani. **IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE DORMENTES DE FERROVIAS USANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS**. 2017. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufes.br/handle/10/9575>. Acesso em: 12 nov. 2021.

FÜLÖP, Ludovic et al. Assessing the challenges of condition assessment of steel-concrete (SC) composite elements using NDE. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 16, n. 16, p. 00887, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00887>.

GARZON, A.J. et al. Modification of four point method to measure the concrete electrical resistivity in presence of reinforcing bars. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 53, p. 249-257, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.013>.

GAWEL, Kamila et al. Effect of carbonation on bulk resistivity of cement/carbon nanofiber composites. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 305, p. 124794, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124794>.

GIBERT, Xavier et al. **Deep Multitask Learning for Railway Track Inspection**. In: IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, 16561023., 2017, Usa. Publisher: IEEE. Usa: Ieee, 2016. p. 153-164. [doi: 10.1109/TITS.2016.2568758](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2568758).

GODART, Bruno. Pathology, Assessment and Treatment of Structures Affected by Delayed Ettringite Formation. **Structural Engineering International**, [S.L.], v. 27, n. 3, p. 362-369, ago. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.2749/101686617x14881932436771>.

GODINHO, J. P. et al. Factors influencing ultrasonic pulse velocity in concrete. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 222-247, abr. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952020000200004>.

GOUEYGOU, Marc et al. Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 42, n. 5, p. 353-360, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.01.002>.

GRAZIA, Mayra T. de et al. The influence of the binder type & aggregate nature on the electrical resistivity of conventional concrete. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 43, p. 102540, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102540>.

GÜNEYLI, Hakan; KARAHAN, Süleyman; GÜNEYLI, Aslıhan. Water content and temperature effect on ultrasonic pulse velocity of concrete. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 53, n. 2, p. 159-166, 2017. <https://doi.org/10.1134/S1061830917020024>.

HAACH, Vladimir G.; RAMIREZ, Fernando C.. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 119, p. 61-70, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.056>.

HANNACHI, Samia; GUETTECHE, M. N. Review of the ultrasonic pulse velocity evaluating concrete compressive strength on site. In: Proceedings of Scientific Cooperation International Workshops on Engineering Branches, Istanbul, Turkey. 2014. p. 8-9.

HASAN, Zaid Ali *et al.* Properties of reactive powder concrete containing different combinations of fly ash and metakaolin. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 42, p. 2436-2440, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.556>.

HASANNEJAD, Morteza et al. Studying of microstructure, interface transition zone and ultrasonic wave velocity of high strength concrete by different aggregates. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-15, 2 dez. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-021-00146-x>.

HASPARYK, Nicole P.; KUPERMAN, S.; TORRES, José Ramalho. Combined attack from AAR and DEF in the foundation blocks of a building. In: Proceeding of. 2016.

HELSEL, Michelle A. et al. **Non-destructive testing to characterize interlayer bonds of idealized concrete additive manufacturing products**. *Ndt & e International*, [S.L.], v. 121, p. 102443, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102443>.

HERKI, Bengin Ma. EFFECT OF DIFFERENT CURING REGIMES ON CAPILLARITY OF CONCRETE INCORPORATING LOCAL MATERIALS. **Journal Of Critical Reviews**, [S.L.], v. 7, n. 04, p. 1-7, 1 fev. 2020. SynthesisHub Advance Scientific Research. <http://dx.doi.org/10.31838/jcr.07.04.98>.

HNIN, Su Wai et al. EFFECTS OF MIX PROPORTION ON ELECTRICAL RESISTIVITY OF CONCRETE WITH FLY ASH. **Asean Engineering Journal**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 53-65, 1 dez. 2017. Penerbit UTM Press. <http://dx.doi.org/10.11113/aej.v7.15492>.

HOBBS, Brian; KEBIR, Mohamed Tchoketch. Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. **Forensic Science International**, [S.L.], v. 167, n. 2-3, p. 167-172, abr. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.06.065>.

HONG, Geuntae et al. Correlation between the Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity of Cement Mortars Blended with Silica Fume: an analysis of microstructure and hydration kinetics. **Materials**, [S.L.], v. 14, n. 10, p. 2476, 11 maio 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14102476>.

HOU, Tsung-Chin et al. Effects of coarse aggregates on the electrical resistivity of Portland cement concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 133, p. 397-408, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.044>.

HUSSEIN, Adan Bishar et al. **REVIEW PAPER ON NON-DESTRUCTIVE TESTING AND THEIR ACCURACIES TO MEASURE THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE**. International Journal Of Engineering Applied Sciences And Technology, Northern Cyprus, v. 5, n. 2455-2143, p. 1-9, abr. 2021. Published Online April 2021 in IJEAST (<http://www.ijeast.com>). <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2021.v05i12.001>.

IAEA (Austria). **Guidebook on non-destructive testing of concrete structures**. TRAINING COURSE SERIES No. 17; Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002.

IAEA (Austria). **Training Guidelines in Non-destructive Testing Techniques: manual for ultrasonic testing at level 2**. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2018. 368 p.

ISAIAS, Geraldo Cechella; BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva; HELENE, Paulo. **Concreto: Ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. 931 p.

IVANCHEV, I. Research on concrete compressive strength in existing reinforced concrete elements with Schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity method and destructive testing of cores. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 1228, n. 1, p. 012034, 1 mar. 2022. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1228/1/012034>.

JABU, Mbatha Abednigo et al. A Review of The Effectiveness of Different Types of Railway Sleepers. **International Journal Of Engineering Trends And Technology**, [S.L.], v. 69, n. 10, p. 193-199, 25 out. 2021. Seventh Sense Research Group Journals. <http://dx.doi.org/10.14445/22315381/ijett-v69i10p224>.

JAIN, Akash et al. Combined Use of Non-Destructive Tests for Assessment of Strength of Concrete in Structure. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 54, p. 241-251, 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.022>.

JAIN, Vaibhav *et al.* Non-destructive test analysis on concrete with rice husk ash and crushed stone additives. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 60, p. 622-626, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.128>.

JAMES, Ashish et al. **A Deep Learning Based Fault Detection for Railway Track Inspection: a deep learning based fault detection for railway track inspection**. In: 2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT RAIL TRANSPORTATION (ICIRT), 18468747., 2018, Singapore. Publisher: IEEE. Singapore: Ieee, 2018. p. 1-5. [doi: 10.1109/ICIRT.2018.8641608](https://doi.org/10.1109/ICIRT.2018.8641608).

JANELIUKSTIS, Rims et al. Flexural cracking-induced acoustic emission peak frequency shift in railway prestressed concrete sleepers. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 178, p. 493-505, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.058>.

JEDIDI, Malek. Evaluation of the Quality of Concrete Structures by the Rebound Hammer Method. **Current Trends In Civil & Structural Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 5, p. 1-8, 2020. Iris Publishers LLC. <http://dx.doi.org/10.33552/ctcse.2020.05.000621>.

JEONG, Gi-Chan; KWON, Seung-Jun. Relationship between Corrosion in Reinforcement and Influencing Factors Using Half Cell Potential Under Saturated Condition. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, v. 9, n. 2, p. 191-199, 2021. <https://doi.org/10.14190/JRCR.2021.9.2.191>.

JIANG, Jingluo *et al.* Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity for Cement, Mortar, and Concrete through a Multiscale Homogenization Approach. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 9, p. 3241, 30 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15093241>.

JING, Guoqing et al. Lateral displacement of different types of steel sleepers on ballasted track. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 186, p. 1268-1275, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.095>.

JING, Guoqing et al. Smart railway sleepers - a review of recent developments, challenges, and future prospects. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 271, p. 121533, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121533>.

JOH, Sung-Ho; HWANG, Seon Keun; KANG, Tae-Ho; PARK, Chul-Soo; LEE, Il-Wha. **Non-destructive Identification of Freezing-Induced Cracks in Concrete Sleepers of High-Speed Railways in South Korea**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, [S.L.], v. 2159, n. 1, p. 98-109, jan. 2010. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2159-13>.

JOKŲBAITIS, Aidas *et al.* ANALYSIS OF STRAIN STATE AND CRACKING OF COCNETRE SLEEPERS. **Journal Of Civil Engineering And Management**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 564-572, 27 abr. 2016. Vilnius Gediminas Technical University. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2016.1147494>.

JOKUBAITIS, Aidas et al. Experimental Research on the Behavior of the Rail Seat Section of Different Types of Prestressed Concrete Sleepers. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 11, p. 2432, 26 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13112432>.

JUNG, Woo-Yong et al. Predicting the remaining service life of land concrete by steel corrosion. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 33, n. 5, p. 663-677, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01034-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01034-7).

KAEWUNRUEN, Sakdirat; REMENNIKOV, Alex M.. Effect of a large asymmetrical wheel burden on flexural response and failure of railway concrete sleepers in track systems. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 1065-1075, dez. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.11.013>.

KAEWUNRUEN, Sakdirat; REMENNIKOV, Alex M.. Progressive failure of prestressed concrete sleepers under multiple high-intensity impact loads. **Engineering Structures**, [S.L.], v. 31, n. 10, p. 2460-2473, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.06.002>.

KENCANAWATI, Ni Nyoman et al. The study of ultrasonic pulse velocity on plain and reinforced damaged concrete. **Matec Web Of Conferences**, [S.L.], v. 195, p. 02026, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201819502026>.

KEßLER, Sylvia; GEHLEN, Christoph. Influence of concrete moisture condition on half-cell potential measurement. In: 5th International Conference on the Durability of Concrete Structures (ICDCS). 2016. p. pp 257-264. <https://doi.org/10.5703/1288284316142>.

KIM, Jihwan; BAE, Younghoon; YI, Na-Hyun; YUN, Chajung. **Delayed Ettringite Formation Damage in Prestressed Concrete Sleepers on Gyeongbu High Speed Line**. Journal Of The Korean Society For Railway, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 97-108, 29 fev. 2020. Korean Society for Railway. <http://dx.doi.org/10.7782/jksr.2020.23.2.97>.

KIM, Jin-Keun et al. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 139-144, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.10.001>.

KIM, Wonchang et al. Correlation Analysis of Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Normal Aggregate and Lightweight Aggregate Concretes in 30–60 MPa Range. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 2952, 18 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15082952>.

KISHORE, Kaushal. Non-destructive testing of concrete by rebound hammer. **Civil Engineering Portal, Retrieved September**, v. 1, 2014.

KIVISTE, Mihkel et al. Half-cell potential mapping for corrosion risk evaluation of prestressed concrete ribbed panels from agricultural building after 20 years of service. **Emu Dspace**, [S.L.], v. 1061, n. 1, p. 1053, 2019. Agronomy Research. <http://dx.doi.org/10.15159/AR.19.100>.

KOVLER, Konstantin et al. Testing of concrete by rebound method: leeb versus schmidt hammers. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 51, n. 5, p. 1-14, out. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-018-1265-1>.

KRISHNA, Rao et al. A study on the influence of curing on the strength of a standard grade concrete mix. **Facta Universitatis - Series: Architecture and Civil Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 23-34, 2010. National Library of Serbia. <http://dx.doi.org/10.2298/fuace1001023k>.

KUCHIPUDI, Sai Teja *et al.* Automated Assessment of Reinforced Concrete Elements using Ground Penetrating Radar. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 140, p. 104378, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104378>.

KUMAR, K. Harish et al. **A study on repair of concrete structure using non destructive tests**. Materials Today: Proceedings, [S.L.], v. 47, p. 5439-5446, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.414>.

KUMAVAT, Hemraj R. et al. Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: a review. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 14, n. 00491, p. 1-12, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00491>.

KUMAVAT, Hemraj R.; CHANDAK, Narayan R.. Experimental Investigations on Effect of Compaction, Curing, Water to Cement Ratio, Cement Type and Temperature Variation on the Rebound Hardness of Concrete. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 25, n. 5, p. 1857-1864, 12 fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-021-1508-5>.

KURDA, Rawaz et al. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 95, p. 169-182, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.004>.

LEE, Byung Jae et al. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. **Advances In Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 2017, p. 1-13, 2017. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/1651753>.

LEE, Taegyu et al. Setting time and compressive strength prediction model of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity testing at early age. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 252, p. 119027, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119027>.

LENCIONI, Julia W. et al. Analysis of Different Parameters in the Electrical Resistivity Test of Concrete. **International Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 27-38, 27 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40999-020-00559-8>.

LENCIS, Uldis; UDRIS, Aigars; KORJAKINS, Aleksandrs. Decrease of the ultrasonic pulse velocity in concrete caused by reinforcement. **Journal of Materials Science and Engineering**. A, v. 1, n. 7A, p. 1016, 2011.

LI, Chen et al. Corrosion assessment of reinforced concrete structures exposed to chloride environments in underground tunnels: theoretical insights and practical data interpretations. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 112, p. 103652, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103652>.

LI, Dan et al. Crack Propagation Assessment of Time-Dependent Concrete Degradation of Prestressed Concrete Sleepers. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 6, p. 3217, 9 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su14063217>.

LI, Dan et al. **Effect of Extreme Climate on Topology of Railway Prestressed Concrete Sleepers**. *Climate*, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 17, 20 jan. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/cli7010017>.

LI, Dan et al. **Time-dependent behaviours of railway prestressed concrete sleepers in a track system**. *Engineering Failure Analysis*, [S.L.], v. 127, p. 105500, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105500>.

LIMA, Eros Henrique de Souza; CARNEIRO, Arnaldo Manoel Pereira. A review of failures of railway monoblock prestressed concrete sleepers. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 137, p. 106389, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106389>.

LIU, Jianxing et al. Comparative analysis of resistance characteristics of composite sleeper and concrete sleeper in ballast bed. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 300, p. 124017, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124017>.

LIU, Yanbo; PRESUEL-MORENO, Francisco. Effect of Elevated Temperature Curing on Compressive Strength and Electrical Resistivity of Concrete with Fly Ash and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag. *ACI Materials Journal*, v. 111, n. 5, 2014.

LOJDA, Vít et al. Investigation of the Elastic Modulus of Polymer Sleepers Under a Quasistatic and Cyclic Loading. **Civil And Environmental Engineering**, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 125-133, 1 dez. 2019. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/cee-2019-0016>.

LOPEZ-CALVO, H.Z. et al. Influence of crack width, cover depth and concrete quality on corrosion of steel in HPC containing corrosion inhibiting admixtures and fly ash. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 88, p. 200-210, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.016>.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. **HANDBOOK ON SECOND EDITION NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE**. 2. ed. London: Crc Press, 2004. 365 p. <https://doi.org/10.1201/9781420040050>.

MANALO, A. et al. A review of alternative materials for replacing existing timber sleepers. **Composite Structures**, [S.L.], v. 92, n. 3, p. 603-611, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.046>.

MAYVILLE, Ronald; JIANG, Liying; SHERMAN, Matthew. **Performance Evaluation of Concrete Railroad Ties on the Northeast Corridor**. Washington, Dc: Ansi Std. 239-18, 2014. 171 p. Disponível em: <https://railroads.dot.gov/elibrary/performance-evaluation-concrete-railroad-ties-northeast-corridor>. Acesso em: 8 Dez. 2021.

MEDEIROS, M. H. F. et al. Corrosion potential: influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 864-885, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000400005>.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A. et al. Accelerated carbonation effect on electrical resistivity and sorptivity of concrete. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-7, 3 ago. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-018-0035-3>.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A.; LIMA, Maryangela G.. Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 107, p. 11-16, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168>.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo Alves de et al. Correlations between water absorption, electrical resistivity and compressive strength of concrete with different contents of pozzolan. **Revista Alconpat**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 152-166, 30 abr. 2019. Alconpat Internacional. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.335>.

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

MEIERHOFER, Christiane; REINHARDT, Hans-Wolf; GERD, Dobmann. **Deterioration processes and standard test methods**. Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures; volume II. Woodhead publishing limited, abington hall, grant park, Cambridge, UK, 2010.

MEMON, Ruhul Pervez et al. Effect of improper curing on the properties of normal strength concrete. **Eng. Technol. Appl. Sci. Res**, v. 8, n. 6, p. 3536-3540, 2018.

MENDES, Adriane Zella et al. Effect of the corrosion degree and the carbonation depth on the electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and corrosion potential. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 1-12, 28 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-019-0055-7>.

MIR, Abdulkader El; NEHME, Salem G.. Repeatability of the rebound surface hardness of concrete with alteration of concrete parameters. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 131, p. 317-326, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.085>.

MOHAMMED, Tarek Uddin; MAHMOOD, Aziz Hasan. Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete. **Ultrasonics**, [S.L.], v. 69, p. 129-136, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2016.04.006>.

MOHAMMED, Tarek Uddin; RAHMAN, Md Nafiur. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 125, p. 832-841, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.102>.

MOURA, Marinara Andrade do Nascimento *et al.* VALIDAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO OBTIDO POR ENSAIOS DE ULTRASSOM. **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto: CBC2019**. Fortaleza, p. 1-14. out. 2019.

NAGROCKIENè, Džigita *et al.* Properties of concrete modified with mineral additives. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 135, p. 37-42, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.215>.

NAJIM, Khalid B.. Strength evaluation of concrete structures using IsonReb linear regression models: laboratory and site (case studies) validation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 149, p. 639-647, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.162>.

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

NIU, Zirong *et al.* Integrated assessment of concrete structure using Bayesian theory and ultrasound tomography. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 274, p. 122086, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122086>.

NORHASRI, M. S. Muhd *et al.* **Evaluation of Structural Integrity for High Rise Buildings Using Non-destructive Test Method**. Civil Engineering And Architecture, [S.L.], v. 9, n. 5, p. 1421-1433, ago. 2021. Horizon Research Publishing Co., Ltd.. <http://dx.doi.org/10.13189/cea.2021.090515>.

OFUYATAN, O *et al.* **Predicting the Compressive Strength of Concrete By Ultrasonic Pulse Velocity**. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, [S.L.], v. 1036, n. 1, p. 012053, 1 mar. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1036/1/012053>.

OLONADE, Kolawole Adisa. INFLUENCE OF WATER-CEMENT RATIO AND WATER REDUCING ADMIXTURES ON THE REBOUND NUMBER OF HARDENED CONCRETE. **Malaysian Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 31-40, 25 nov. 2020. Penerbit UTM Press. <http://dx.doi.org/10.11113/mjce.v32.16219>.

PANEDPOJAMAN, Pattamad; TONNAYOPAS, Danupon. Rebound hammer test to estimate compressive strength of heat exposed concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 172, p. 387-395, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.179>.

PAUL, Suvash Chandra *et al.* An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete. **Measurement**, [S.L.], v. 124, n. 1, p. 205-210, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.033>.

PERLIN, Lourenço Panosso; PINTO, Roberto Caldas de Andrade. Use of network theory to improve the ultrasonic tomography in concrete. **Ultrasonics**, [S.L.], v. 96, p. 185-195, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2019.01.007>.

PINTO, Roberto CA *et al.* Use of ultrasound to estimate depth of surface opening cracks in concrete structures. **E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics**, v. 8, p. 1-11, 2010.

PINTO, Sabrina Requião *et al.* Effect of preconditioning temperature on the water absorption of concrete. **Journal Of Building Pathology And Rehabilitation**, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 1-10, 23

jan. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-018-0032-6>.

PLATONOV, A D et al. **Increasing the service life of sleepers made from birch wood**. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science, [S.L.], v. 226, p. 012030, 19 fev. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012030>.

POKORNY, Milan et al. Determination of the Dynamic Modulus of Elasticity and the Thickness of Concrete Structures by Non-Destructive Methods. **Key Engineering Materials**, [S.L.], v. 691, p. 344-355, maio 2016. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.691.344>.

PORTELLA, Kleber Franke et al. Alkali-silica reaction (ASR) - Investigation of crystallographic parameters of natural sands by backscattered electron diffraction. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 1-13, 2021. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952021000300008>.

POUR-GHAZ, Mohammad; ISGOR, O. Burkan; GHODS, Pouria. Quantitative interpretation of half-cell potential measurements in concrete structures. **Journal of materials in civil engineering**, v. 21, n. 9, p. 467-475, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:9\(467\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:9(467))

PRESUEL-MORENO, F. et al. Numerical modeling of the effects of rebar presence and/or multilayered concrete resistivity on the apparent resistivity measured via the Wenner method. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 48, p. 16-25, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.053>.

RAACH, Y et al. Influence of concrete age on the behavior of ultrasonic waves in interfaces (concrete–steel–concrete). **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, [S.L.], v. 234, n. 21, p. 4239-4257, 28 abr. 2020. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954406220921196>.

RAMESH, Gomasa et al. **Repair, rehabilitation and retrofitting of reinforced concrete structures by using non-destructive testing methods**. Materials Today: Proceedings, [S.L.], p. 1-6, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.778>.

REDDY, V Srinivasa et al. **Electrical Resistivity and Half-Cell Potential Studies to assess organic and inorganic corrosion inhibitors' effectiveness in concrete**. E3S Web Of Conferences, [S.L.], v. 184, p. 01082, 2020. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202018401082>.

REICHLING, K. et al. Full surface inspection methods regarding reinforcement corrosion of concrete structures. **Materials And Corrosion**, [S.L.], v. 64, n. 2, p. 116-127, 23 jul. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/maco.201206625>.

REVILLA-CUESTA, Víctor et al. **Models for compressive strength estimation through non-destructive testing of highly self-compacting concrete containing recycled concrete aggregate and slag-based binder**. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 280, p. 122454, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122454>.

RISAN, Hussam K.; FARHAN, Omar Shamal; ABDULRIDHA, Abdulkalik J. Influence of Embedded Reinforcement in a High Strength Concrete on Ultrasonic Pulse Velocity and Core Test. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 14, n. 1, p. 29-34, 2017. <http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.14.3985>.

ROBLES, Kevin Paolo V. et al. Effect of the Geometrical Constraints to the Wenner Four-Point Electrical Resistivity Test of Reinforced Concrete Slabs. **Sensors**, [S.L.], v. 21, n. 13, p. 4622, 5 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s21134622>.

ROBLES, Kevin Paolo V. et al. Electrical Resistivity Measurements for Nondestructive Evaluation of Chloride-Induced Deterioration of Reinforced Concrete—A Review. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 8, p. 2725, 7 abr. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15082725>.

ROUFAEL, Georges et al. Influence of lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121221, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121221>.

RUCKA, Magdalena. Special Issue: **non-destructive testing of structures**. **Materials**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 4996, 6 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma13214996>.

SABBAĝ, Nevbahar et al. Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. **Journal Of Applied Geophysics**, [S.L.], v. 141, p. 13-23, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.04.005>.

SABBAĝ, Nevbahar; UYANđK, Osman. Prediction of reinforced concrete strength by ultrasonic velocities. **Journal Of Applied Geophysics**, [S.L.], v. 141, p. 13-23, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.04.005>.

SAFIUDDIN, Md; RAMAN, S. N.; ZAIN, M. F. M. Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 1, n. 2, p. 87-95, 2007.

SAHA, Anindya Samya; AMANAT, Khan Mahmud. Rebound hammer test to predict in-situ strength of concrete using recycled concrete aggregates, brick chips and stone chips. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 268, p. 121088, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121088>.

SAHA, Ashish Kumer et al. Non-destructive prediction of strength of concrete made by lightweight recycled aggregates and nickel slag. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 33, p. 101614, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101614>.

SALAH, Muhammad Ali *et al.* Effect of steel reinforcement distribution on ultrasonic pulse velocity measurements. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 1090, n. 1, p. 012049, 1 mar. 2021. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1090/1/012049>.

SALEH, Eman et al. **Guide to non-destructive concrete strength assessment: homogeneity tests and sampling plans**. *Journal Of Building Engineering*, [S.L.], v. 49, p. 104047, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104047>.

SANCHEZ, Kristine; TARRANZA, Nathaniel. Reliability of Rebound Hammer Test in Concrete Compressive Strength Estimation. **International Journal Of Advances In Agricultural & Environmental Engineering**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 198-202, 21 jan. 2015. International Institute of Engineers. <http://dx.doi.org/10.15242/ijaaee.c1114040>.

SANTOS, Antonio Carlos dos. Ensaios não destrutivos nas estruturas de concreto. Produção de Antônio Carlos dos Santos. Realização de Antônio Carlos dos Santos. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Son., color. Disponível em: <https://studio.youtube.com/video/8t-3vEi0xkg/edit>. Acesso em: 14 set. 2022.

SENGUL, Ozkan. Use of electrical resistivity as an indicator for durability. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 73, p. 434-441, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077>.

SHAKERI, Ashkan et al. **Development of fibre-reinforced concrete mix for manufacturing non-prestressed concrete sleepers**. Structures, [S.L.], v. 37, p. 588-599, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2022.01.035>.

SIDDHARTHA, K. Kiran et al. **PREDICTION OF CORROSION ACTIVITY LEVELS OF HYSD BARS IN OPC SCC AND GPC BY ELECTRICAL RESISTIVITY METHOD AND HALF CELL POTENTIAL METHOD**. International Journal Of Civil Engineering And Technology (Ijciet): © IAEME Publication, Pradesh, India, v. 10, n. 0976-6316, p. 32-49, dez. 2019. <http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp>.

SILVA, Fernando A. N. et al. Use of Nondestructive Testing of Ultrasound and Artificial Neural Networks to Estimate Compressive Strength of Concrete. **Buildings**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 44, 27 jan. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings11020044>.

SILVA, Iara et al. **Recovery of Cracks in Concrete Railroad Sleepers: procedure and case study**. Procedia Structural Integrity, [S.L.], v. 11, p. 130-137, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.018>.

SILVA, Yvis J. et al. **Integrated approach based on non-destructive technique and numerical simulation for assessment of corrosion in bridge**. Journal Of Building Pathology And Rehabilitation, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 1-14, 27 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s41024-022-00167-0>.

SLDOZIAN, Rami Joseph Aghajan; HAMAD, Ali Jihad. Influence of Different Curing Ways on the Properties of Concrete. **Glob. Res. Dev. J. Eng**, v. 4, p. 2455-5703, 2019.

SOFI, Massoud et al. Condition assessment of concrete by hybrid non-destructive tests. **Journal Of Civil Structural Health Monitoring**, [S.L.], v. 9, n. 3, p. 339-351, 21 maio 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-019-00336-9>.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia recuperação e reforço de estruturas de concretos**. São Paulo: Pini, Ltda, 2009. 262 p. [Www.piniweb.com - manuais@pini.com.br](http://www.piniweb.com-manuais@pini.com.br).

SU, Jin-Kiang et al. Effect of moisture content on concrete resistivity measurement. **Journal Of The Chinese Institute Of Engineers**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 117-122, jan. 2002. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02533839.2002.9670686>.

TAN, Yongshan et al. **Compressive strength evaluation of coral aggregate seawater concrete (CAC) by non-destructive techniques**. Engineering Structures, [S.L.], v. 176, p. 293-302, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.104>.

TANTA, Ankush et al. **Performance evaluation of hemp concrete by non-destructive test**. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 50, p. 1766-1769, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.190>.

TANYILDIZI, Harun; ŞAHIN, Murat. Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 79, p. 97-103, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.039>.

TARANGINI, D. et al. Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 51, p. 2185-2189, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.132>.

TARUSSOV, Alexander *et al.* Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 38, p. 1246-1254, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.05.026>.

TASKER, Lee *et al.* Time-lapse monitoring of internal alteration of a concrete structure using ground penetrating radar. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 191, p. 300-310, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.008>.

TATARINOV, Alexey et al. Assessment of cracks in pre-stressed concrete railway sleepers by ultrasonic testing. **Procedia Computer Science**, [S.L.], v. 149, p. 324-330, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.143>.

THIELE, Marc; PIRSKAWETZ, Stephan. Analysis of Damage Evolution in Concrete under Fatigue Loading by Acoustic Emission and Ultrasonic Testing. **Materials**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 341, 4 jan. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma15010341>.

THOMAZ, William de Araujo et al. Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 1-17, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00645>.

TOSTI, Fabio; FERRANTE, Chiara. Using Ground Penetrating Radar Methods to Investigate Reinforced Concrete Structures. **Surveys In Geophysics**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 485-530, 21 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-019-09565-5>.

TRTNIK, G.; TURK, G.. Influence of superplasticizers on the evolution of ultrasonic P-wave velocity through cement pastes at early age. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 51, p. 22-31, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.007>.

WANG, Her-Yung. Durability of self-consolidating lightweight aggregate concrete using dredged silt. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 23, n. 6, p. 2332-2337, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.006>.

WANG, Qiang et al. Evaluation Residual Compressive Strength of Tunnel Lining Concrete Structure after Fire Damage Based on Ultrasonic Pulse Velocity and Shear-Wave Tomography. **Processes**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 560, 13 mar. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/pr10030560>.

WANG, Y. et al. The effect of water-cement ratio on acousto-ultrasonic characteristics in mortar. **Russian Journal Of Nondestructive Testing**, [S.L.], v. 53, n. 2, p. 148-158, fev. 2017. Pleiades Publishing Ltd. <http://dx.doi.org/10.1134/s1061830917020097>.

WEI, Xiaosheng; XIAO, Lianzhen. Influence of the aggregate volume on the electrical resistivity and properties of portland cement concretes. **Journal Of Wuhan University Of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [S.L.], v. 26, n. 5, p. 965-971, out. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-011-0346-6>.

WU, Xiaogang et al. Mechanical Properties and Damage Mechanism of Shale Ceramsite Concrete after High-Temperature Treatment. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 34, n. 7, p. 1-10, jul. 2022. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004279](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004279).

- XU, Taozhi; LI, Jie. Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test of drilled cores. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 188, p. 820-832, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.138>.
- XU, Wenbin et al. Coupled effect of curing temperature and age on compressive behavior, microstructure and ultrasonic properties of cemented tailings backfill. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 237, p. 117738, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117738>.
- YANG, Suhang et al. Prediction of Compressive Strength of Concrete Using Double-Shear Testing Method. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 1-12, jan. 2021. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)jmt.1943-5533.0003505](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)jmt.1943-5533.0003505).
- YANG, Yonggan et al. Characterization of surface hardness and microstructure of high performance concrete. **Journal Of Wuhan University Of Technology-Mater. Sci. Ed.**, [S.L.], v. 33, n. 1, p. 124-132, 31 jan. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11595-018-1796-x>.
- YODSUDJAI, Wanchai; PATTARAKITTAM, Thanawit. Factors influencing half-cell potential measurement and its relationship with corrosion level. **Measurement**, [S.L.], v. 104, p. 159-168, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.03.027>.
- YOU, Ruilin; KAEWUNRUEN, Sakdirat. Evaluation of remaining fatigue life of concrete sleeper based on field loading conditions. **Engineering Failure Analysis**, [S.L.], v. 105, p. 70-86, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.06.086>.
- YU, Hailing et al. Railroad concrete tie failure modes and research needs. In: 2015 **Transportation Research Board 94th Annual Meeting**, TRB15-0311. 2015.
- ZAKI, Ahmad *et al.* Experimental Assessment of Rebar Corrosion in Concrete Slab Using Ground Penetrating Radar (GPR). **International Journal Of Corrosion**, [S.L.], v. 2018, p. 1-10, 21 nov. 2018. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2018/5389829>.
- ZATAR, Wael *et al.* Environmental effects on condition assessments of concrete structures with ground penetrating radar. **Journal Of Applied Geophysics**, [S.L.], v. 203, p. 104713, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104713>. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104713>.
- ZHANG, Dawei; ZHAI, Wanming; WANG, Kaiyun; LIU, Pengfei. **Vertical Vibration Characteristics of a Concrete Sleeper with Cracks in a Heavy-Haul Railway**. ICTE 2015, [S.L.], 21 set. 2015. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784479384.152>.
- ZHAO, Shan *et al.* Prediction of thin asphalt concrete overlay thickness and density using nonlinear optimization of GPR data. **Ndt & e International**, [S.L.], v. 100, p. 20-30, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.08.001>.
- ZHENG, Yuanxun *et al.* Application of Nondestructive Testing Technology in Quality Evaluation of Plain Concrete and RC Structures in Bridge Engineering: a review. **Buildings**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 843, 16 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings12060843>.
- ZOU, Z. H. et al. Relationship between half-cell potential and corrosion level of rebar in concrete. **Corrosion Engineering, Science And Technology**, [S.L.], v. 51, n. 8, p. 588-595, 19 maio 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/1478422x.2016.1167304>.

APÊNDICES

APÊNDICE A **ANÁLISE S ESTATÍSTICAS**

Apêndice A3 - Esclerometria – Centro, Face 01 e Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 01 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	42.7168	4	10.6792	7.30181	0.00013	2.57874
Dentro de grupos	65.8144	45	1.46254			
Total	108.531	49				

ANOVA (Face 01 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	94.8848	3	31.6283	8.55156	0.00013	2.81154
Dentro de grupos	166.434	45	3.69854			
Total	261.319	48				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	CENTRO - FACE 01 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	0,500	0,101	0,284	0,054	-	-	-
	G2	-	0,002	0,007	< 0,001	-	-	-
	G3	-	-	0,975	1,000	-	-	-
	G4	-	-	-	0,978	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	0,884	0,005	0,003
	G7	-	-	-	-	-	0,006	0,005
	G9	-	-	-	-	-	-	0,966

Apêndice A4 - Esclerometria – Ombro, Face 02 e Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 02 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	138.314	4	34.5784	9.38716	1.163E-05	2.56954
Dentro de grupos	173.129	47	3.68359			
Total	311.442	51				

ANOVA (Face 02 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	125.792	3	41.9306	11.964	7.4E-06	2.81647
Dentro de grupos	154.208	44	3.50473			
Total	280	47				

Apêndice A6 – Ultrassom - Ombro, Face 1-3, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	2816613.45	4	704153.36	38.04279	1.333E-13	2.58883
Dentro de grupos	795908.76	43	18509.50			
Total	3612522.222	47				

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	2180718.48	3	726906.16	20.8685	1.468E-08	2.8165
Dentro de grupos	1532634.98	44	34832.61			
Total	3713353.47	47				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	CENTRO - FACE 1-3 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	-	-	-
	G2	-	0,0681	0,002	< 0,001	-	-	-
	G3	-	-	0,084	0,011	-	-	-
	G4	-	-	-	0,960	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	< 0,001	0,789	0,969
	G7	-	-	-	-	-	< 0,001	< 0,001
	G9	-	-	-	-	-	-	0,952

Apêndice A7 – Ultrassom - Centro, Face 1-3, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	1384204.76	4	346051.19	26.93500	4.104E-11	2.5942
Dentro de grupos	539600.73	42	12847.63			
Total	1923805.49	46				

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	2330922.30	3	776974.1	52.291	1.039E-14	2.8115
Dentro de grupos	668636.50	45	14858.58			
Total	2999558.81	48				

Apêndice A9 - Resultados do teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$, para o ensaio de módulo dinâmico (análise da variação dos resultados ao longo da região dos ombros e centro para os grupos 2, 3 e 4)

Grupos	FACES	Valor ρ	
		Região	
		Centro	Ombro Dir
02	Ombro Esq	0,037	0,912
	Centro	-	0,017
03	Ombro Esq	0,593	0,054
	Centro	-	0,036
04	Ombro Esq	0,051	0,131
	Centro	-	< 0,001

Apêndice A10 – Módulo dinâmico - Ombro, Face 1-3, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	42.65882	4	10.6647059	6.5545	0.000291	2.5740
Dentro de grupos	74.84498	46	1.62706479			
Total	117.5038	50				

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	234.08	3	78.0292	20.8685	1.468E-08	2.8165
Dentro de grupos	22.2545	44	0.50574			
Total	256.342	47				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	OMBRO - FACE 1-3 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	0,009	< 0,001	0,126	0,244	-	-	-
	G2	-	0,627	0,800	0,434	-	-	-
	G3	-	-	0,104	0,020	-	-	-
	G4	-	-	-	0,983	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	< 0,001	1,000	< 0,001
	G7	-	-	-	-	-	< 0,001	0,158
	G9	-	-	-	-	-	-	< 0,001

Apêndice A11 – Módulo dinâmico - Centro, Face 1-3, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	42.619867	4	10.65496683	11.4652	1.84E-06	2.58366
Dentro de grupos	40.890313	44	0.92932529			
Total	83.51018	48				

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	250.359	3	83.4531	52.291	1.039E-14	2.8115
Dentro de grupos	22.8948	44	0.52033			
Total	273.254	47				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	CENTRO - FACE 1-3 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	< 0,001	< 0,001	0,129	0,853	-	-	-
	G2	-	0,902	0,176	0,001	-	-	-
	G3	-	-	0,034	< 0,001	-	-	-
	G4	-	-	-	0,488	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	< 0,001	0,198	< 0,001
	G7	-	-	-	-	-	< 0,001	0,023
	G9	-	-	-	-	-	-	< 0,001

Apêndice A12 – Resistividade elétrica superficial – Ombro, Face 01, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 01 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	345.384	4	86.346	1.8416	0.1362	2.5652
Dentro de grupos	2250.49	48	46.885			
Total	2595.87	52				

ANOVA (Face 01 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	109.339	3	36.447	2.0228	0.1238	2.8068
Dentro de grupos	828.785	46	18.017			
Total	938.125	49				

Apêndice A13 - Resistividade elétrica superficial – Centro, Face 01 e Fabricante A e B -
Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 01 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	507.1	4	126.7742	3.4941	0.0140	2.5695
Dentro de grupos	1705.2	47	36.281585			
Total	2212.3	51				

ANOVA (Face 01 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	444.02	3	148.01	9.6792	5.04E-05	2.8164
Dentro de grupos	672.82	44	15.291			
Total	1116.8	47				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	CENTRO - FACE 01 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	0,096	0,953	1,000	0,998	-	-	-
	G2	-	0,0200	0,0830	0,0210	-	-	-
	G3	-	-	0,947	0,987	-	-	-
	G4	-	-	-	0,998	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	0,003	< 0,001	0,1650
	G7	-	-	-	-	-	0,221	0,362
	G9	-	-	-	-	-	-	0,0080

Apêndice A14 - Resistividade elétrica superficial – Ombro, Face 02 e Fabricante A e B -
Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 02 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	1188.36	4	297.09	6.0448	0.00051	2.5652
Dentro de grupos	2359.08	48	49.148			
Total	3547.45	52				

ANOVA (Face 02 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	310.43	3	103.479	3.37489	0.02617	2.80684
Dentro de grupos	1410.43	46	30.6615			
Total	1720.87	49				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	OMBRO - FACE 02 (Valor ρ)						
		Ombro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	0,783	0,068	0,060	0,298	-	-	-
	G2	-	0,004	0,003	0,019	-	-	-
	G3	-	-	1,000	0,807	-	-	-
	G4	-	-	-	0,829	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	0,055	0,094	0,020
	G7	-	-	-	-	-	0,996	0,913
	G9	-	-	-	-	-	-	0,837

Apêndice A15 – Resistividade elétrica superficial - Centro, Face 02 e Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 02 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	460.89	4	115.224	3.0414	0.0265	2.5787
Dentro de grupos	1704.80	45	37.8845			
Total	2165.70	49				

ANOVA (Face 02 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	83.1036	3	27.7012	0.8392	0.4793	2.8068
Dentro de grupos	1518.27	46	33.0060			
Total	1601.38	49				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	CETRO - FACE 02 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	0,5490	0,7970	0,3880	0,9870	-	-	-
	G2	-	0,1260	0,0160	0,2180	-	-	-
	G3	-	-	0,9920	0,9370	-	-	-
	G4	-	-	-	0,5860	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	-	-	-
	G7	-	-	-	-	-	-	-
	G9	-	-	-	-	-	-	-

Apêndice A16 – Resistência à compressão - Ombro, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	196.9292	4	49.2323	0.7581	0.5754	3.4780
Dentro de grupos	649.3778	10	64.9377			
Total	846.3071	14				

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	224.08	3	74.6951	6.1858	0.0176	4.0662
Dentro de grupos	96.604	8	12.0751			
Total	320.687	11				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	OMBRO - FACE 1-3 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	-	-	-	-	-	-	-
	G2	-	-	-	-	-	-	-
	G3	-	-	-	-	-	-	-
	G4	-	-	-	-	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	0,144	0,589	0,014
	G7	-	-	-	-	-	0,671	0,386
	G9	-	-	-	-	-	-	0,083

Apêndice A17 – Resistência à compressão - Centro, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	1787.70	4	446.92	3.4628	0.0220	2.7587
Dentro de grupos	3226.61	25	129.06			
Total	5014.32	29				

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	32.2387	3	10.7462	0.2112	0.8873	3.0983
Dentro de grupos	1017.15	20	50.8577			
Total	1049.39	23				

Apêndice A20 – Índice de vazios - Centro, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	75.47325	4	18.86831	52.92254	7.63E-12	2.75871
Dentro de grupos	8.913174	25	0.356527			
Total	84.38642	29				

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	73.73501	3	24.57834	117.164	7.38E-13	3.0983
Dentro de grupos	4.195529	20	0.209776			
Total	77.93054	23				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	CENTRO - FACE 1-3 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	-	-	-
	G2	-	0,9690	< 0,001	< 0,001	-	-	-
	G3	-	-	< 0,001	< 0,001	-	-	-
	G4	-	-	-	0,6320	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	0,9340	< 0,001	< 0,001
	G7	-	-	-	-	-	< 0,001	< 0,001
	G9	-	-	-	-	-	-	< 0,001

Apêndice A21 - Resultados do teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$, para o ensaio de absorção por capilaridade (análise da variação dos resultados ao longo da região dos ombros e centro para os grupos 3 e 4)

Grupos	Fases	Valor ρ	
		Região	
		Centro	Ombro Dir
03	Ombro Esq	0,049	0,961
	Centro	-	0,030
04	Ombro Esq	< 0,001	0,001
	Centro	-	0,904

Apêndice A22 – Absorção por capilaridade - Ombro, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	1.36E-05	4	3.405E-06	21.687	6.46E-05	3.47804
Dentro de grupos	1.57E-06	10	1.570E-07			
Total	1.52E-05	14				

ANOVA (Face 1-3 – Ombro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	7.55E-06	3	2.51E-06	21.592639	0.000343	4.06618
Dentro de grupos	9.32E-07	8	1.16E-07			
Total	8.48E-06	11				

Teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$

Fabricante	Grupos	OMBRO - FACE 1-3 (Valor ρ)						
		Centro						
		G2	G3	G4	G5	G7	G9	G10
A	G1	0,0019	0,010	0,869	0,016	-	-	-
	G2	-	< 0,001	0,082	1,000	-	-	-
	G3	-	-	0,002	< 0,001	-	-	-
	G4	-	-	-	0,070	-	-	-
B	G6	-	-	-	-	0,009	< 0,001	0,002
	G7	-	-	-	-	-	0,024	0,688
	G9	-	-	-	-	-	-	0,114

Apêndice A23 – Absorção por capilaridade - Centro, Fabricante A e B - Análise de Variância (ANOVA) e teste de *Tukey* com $\rho > 0,05$ entre os grupos de dormente

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante A)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	1.88794E-05	4	4.72E-06	126.5593	3.3E-16	2.75871
Dentro de grupos	9.32338E-07	25	3.73E-08			
Total	1.98117E-05	29				

ANOVA (Face 1-3 – Centro - Fabricante B)

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	valor ρ	F crítico
Entre grupos	1.73608E-05	3	5.79E-06	10.70262	0.000207	3.098391
Dentro de grupos	1.08141E-05	20	5.41E-07			
Total	2.81749E-05	23				

