

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Parâmetros ambientais

Durante as visitas realizadas no edifício foram realizadas medidas de temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂ na atmosfera. Os resultados são apresentados nas seções 4.1.1 e 4.1.2.

4.1.1 Temperatura e umidade relativa

As medidas de temperatura e umidade relativa, obtidas através de um *data logger* instalado na área do auditório estão consolidadas nas Figuras 18 e 19 e indicam valores de temperatura variando aproximadamente entre 25,5 °C e 28,5 °C durante o mês de outubro. Os resultados de umidade relativa indicam valores variando entre 50 e 80 % aproximadamente, durante o mesmo período.

Os valores de umidade relativa, apesar de representarem dados referentes apenas ao mês outubro, indicam uma faixa de variação da umidade relativa bastante favorável para ao processo de carbonatação, conforme já consolidado na literatura (ANDRADE, 1988).

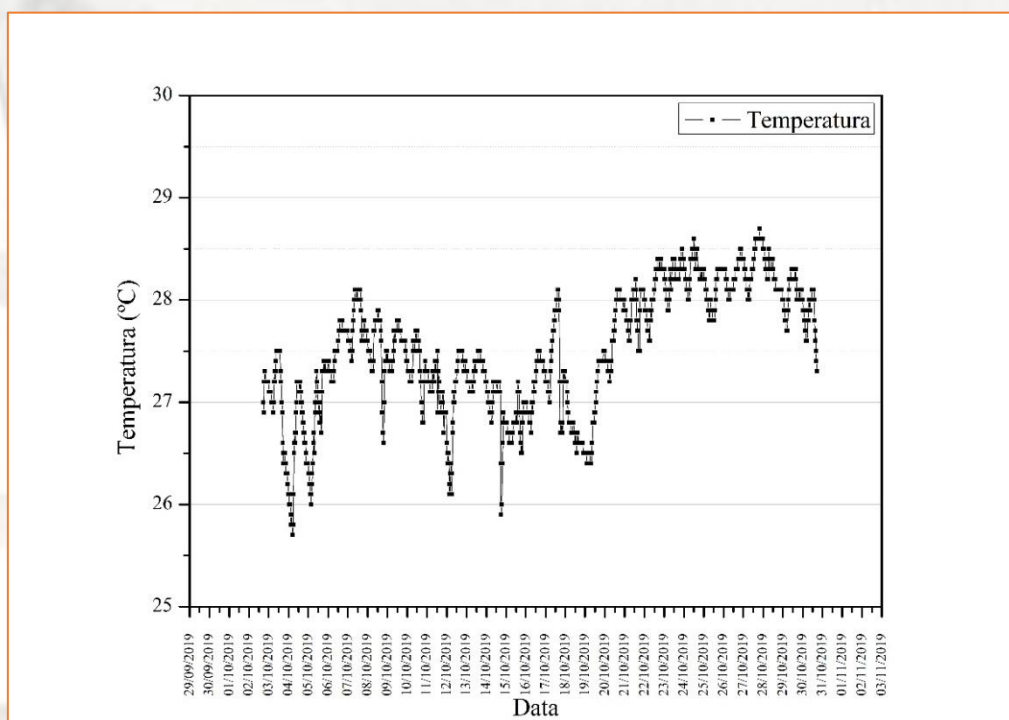


Figura 18 – Dados de temperatura coletados na área do auditório, durante o mês de outubro.

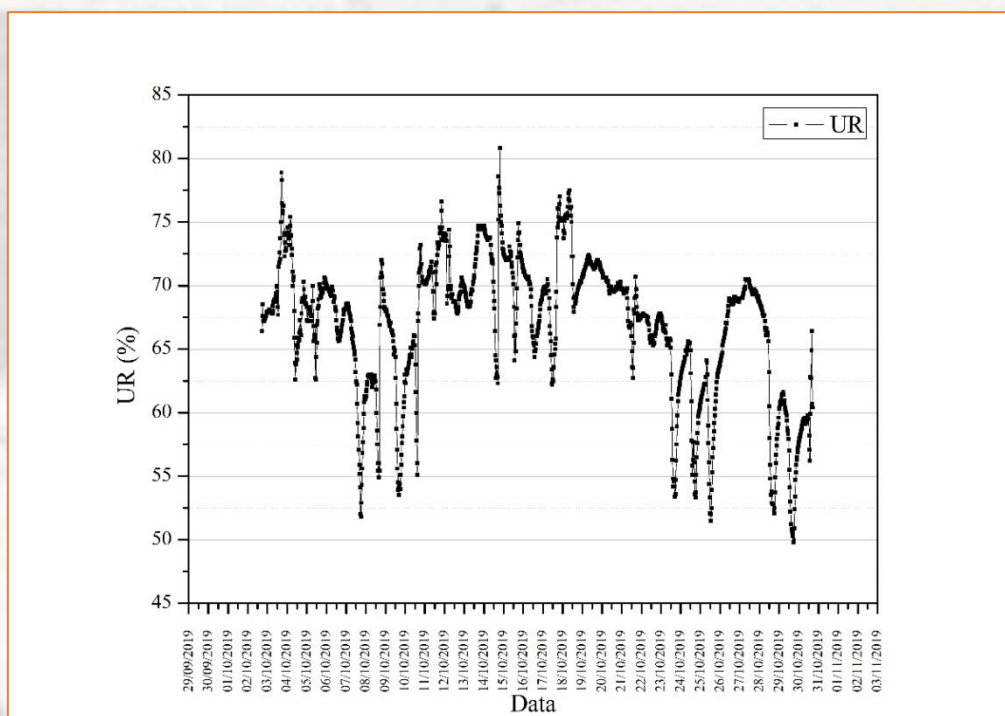


Figura 19 – Dados de umidade relativa coletados na área do auditório, durante o mês de outubro.

Além das medidas pontuais, foram resgatados dados climatológicos diários registrados na estação climatológica do INMET em João Pessoa-PB, no período de 1999 a 2019, o que caracteriza bem o período de exposição da estrutura. Esses dados são apresentados nas Figuras 20 e 21, a seguir.

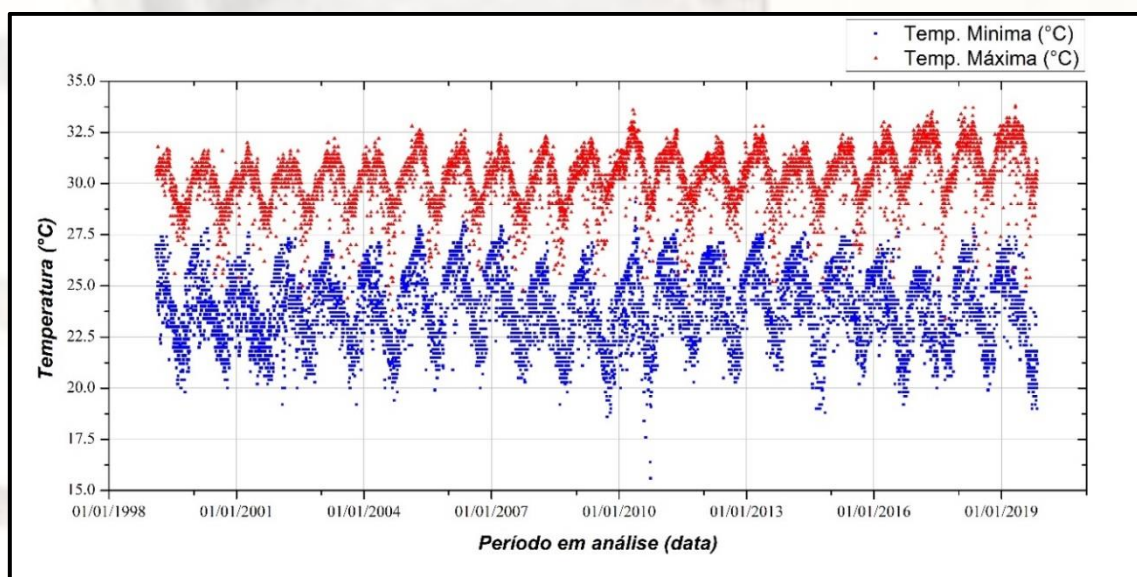


Figura 20 – Dados de temperatura representativos da região onde se insere a edificação, no período de 1999 a 2019.

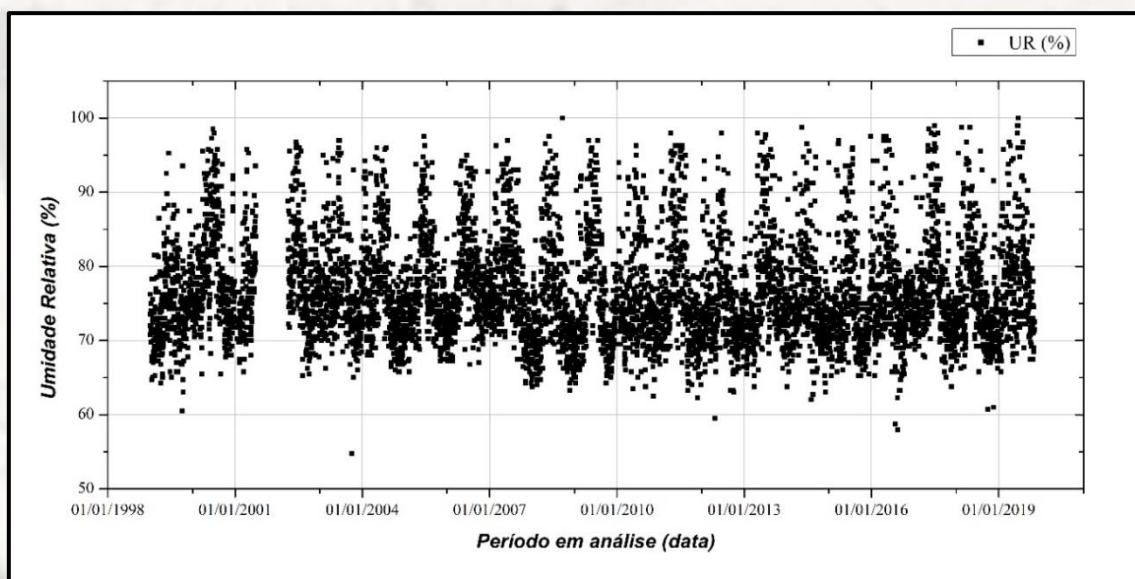


Figura 21 – Dados de umidade relativa, representativos da região onde se insere a edificação, no período de 1999 a 2019.

Os resultados apresentados na Figura 20 descrevem temperaturas variando, ao longo do ano, aproximadamente entre 20 e 32,5 °C e umidades relativas entre 65 e 95 %, com maior concentração entre 67,5 e 80 %. Isso indica um cenário favorável ao avanço da corrosão (após a despassivação da armadura), com umidades elevadas. As medidas climatológicas realizadas *in loco* corroboram esse cenário.

4.1.2 Concentração de CO₂

Os resultados de concentração de CO₂ são apresentados na Tabela 1, para os diversos ambientes estudados.

Tabela 1 - Medidas de concentração de CO₂ nos ambientes do auditório, área do corredor contíguo ao auditório e área da escada.

Ambiente		Média (ppm)	CV (%)	Número de medidas
Auditório	Janela fechada	412	17,9	45
	Janela aberta	262	8,2	40
Corredor		244	5,7	20
Área da escada		307	5,0	20

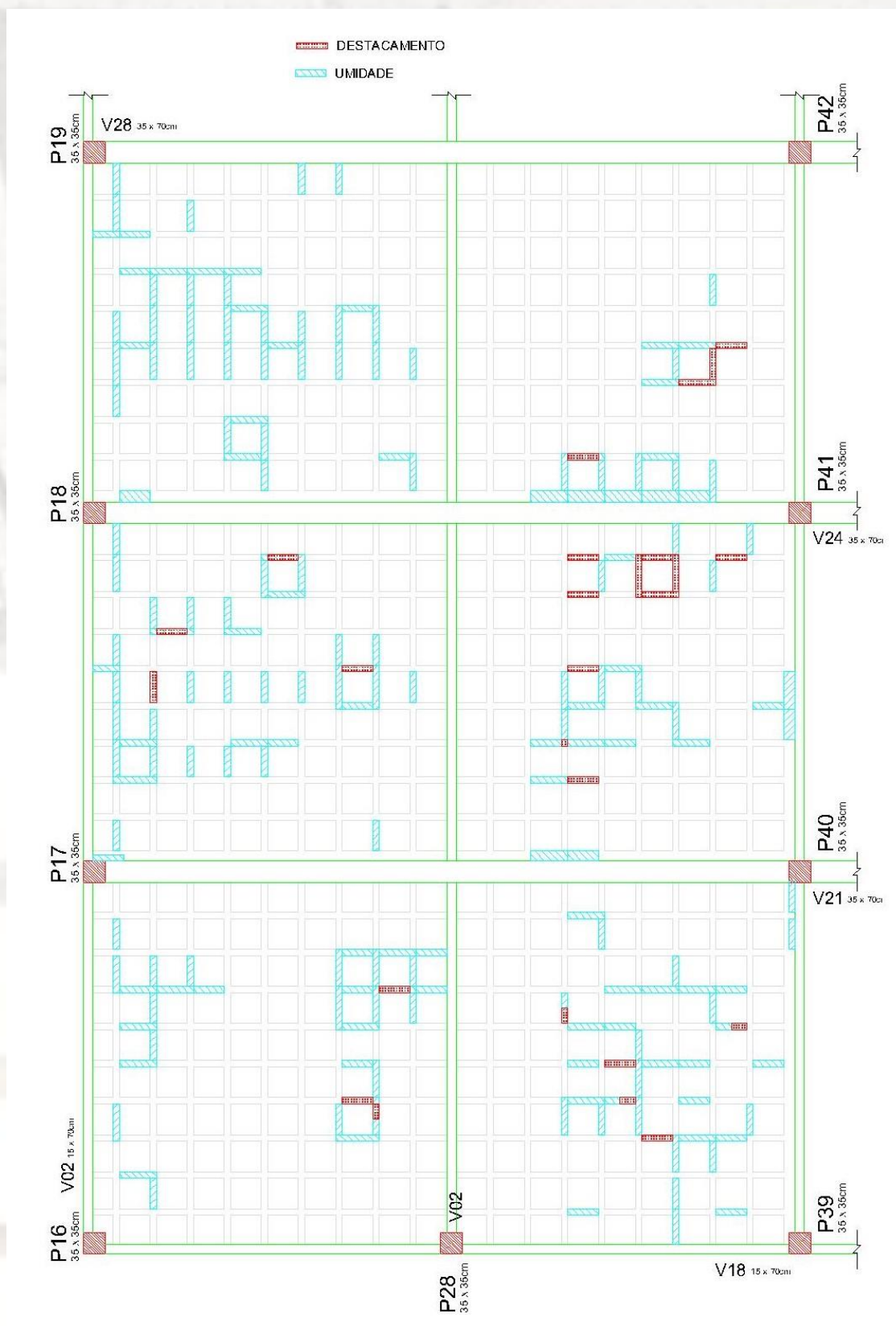
Na área do auditório, as medidas de concentração de CO₂ se apresentam de duas formas. Quando as janelas são mantidas fechadas, há uma tendência de crescimento da concentração de CO₂, explicada pela ausência de renovação do ar, com valores médios acima de 400 ppm. Por outro lado, com as janelas abertas, há uma redução significativa nos valores da concentração de CO₂, com valores médios da ordem de 260 ppm.

Na área do corredor contíguo ao auditório, como há uma renovação constante do ar, observou-se uma concentração média de 244 ppm. Na área da escada, que é um ambiente que se mantém boa parte do tempo fechado, observou-se uma concentração média de 307 ppm.

Como avaliação geral, percebe-se o ambiente do auditório com concentrações elevadas, acima do esperado para áreas internas de uma edificação com ventilação regular (em geral com valores abaixo de 300 ppm), o que favorece ao avanço do processo de carbonatação do concreto na área do auditório.

4.2 Exame visual da estrutura

Nesta etapa, procedeu-se a verificação de pontos de fissuração, desprendimentos de placas de concreto e infiltração na estrutura, com vistas a identificar regiões com grau de degradação. A Figura 22 apresenta áreas com vestígios de infiltração (novas ou antigas) e desprendimentos de placas de concreto, enquanto que a Figura 24 apresenta áreas com a presença de fissuras, bem como a identificação da abertura dessas fissuras.



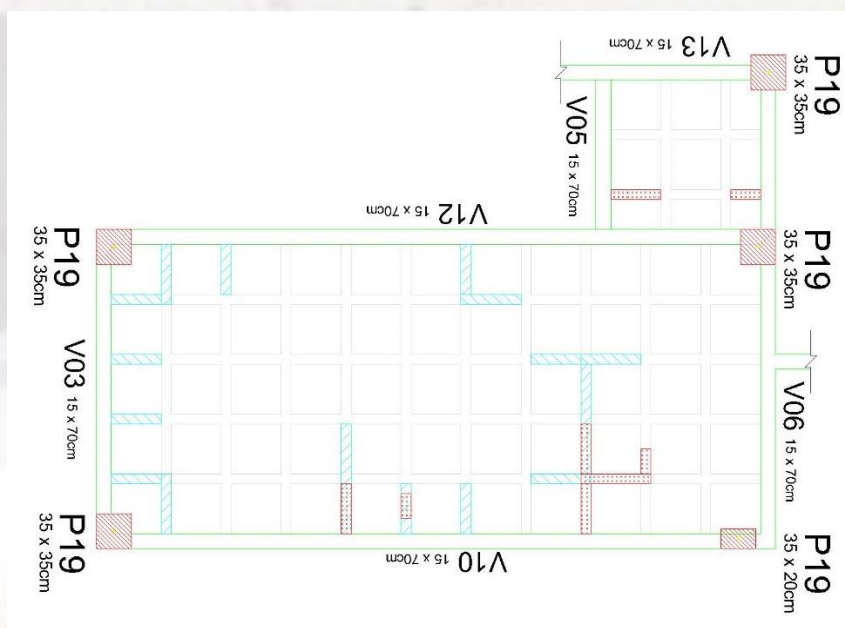


Figura 22 – Identificação dos pontos de umidade e desprendimentos de placas de concreto (lajes do auditório e da escada).

Com base na Figura 22, observa-se uma maior concentração de desprendimentos de placas de concreto na Laje 5, consequência de processos de corrosão avançados, conforme observa-se nas imagens subsequentes (ver Figura 23). Por outro lado, a presença de infiltrações, novas ou antigas (recuperadas ou não) se faz presente em todas as lajes, com maior incidência nas lajes 1, 2, 5 e 6.

A presença de infiltrações nas lajes certamente contribuiu para acelerar o processo de corrosão das armaduras em pontos já despassivados. A Figura 23 exemplifica, através de imagens, pontos de desprendimentos de placas de concreto nas lajes, bem como, pontos de infiltração.



Figura 23 – Imagens de pontos de desprendimentos do concreto e infiltração nas lajes do auditório.

Com base na Figura 23, observa-se um amplo processo de fissuração nas lajes do auditório, com maior concentração na sua área mais central, com fissuras variando de 0,2 m a 1,6 mm. Essas fissuras, no que se refere às lajes, são, em sua maioria, decorrentes do processo de corrosão das armaduras, que se apresenta de forma mais intensa nas lajes 2 e 5. No que se refere às vigas, além da presença de fissuras com menor abertura, elas são típicas de fissuras de retração, possivelmente originadas nas primeiras idades após a execução desta região da estrutura de coberta. A Figura 24 apresenta imagens ilustrativas de vigas e lajes com processos de fissuração.

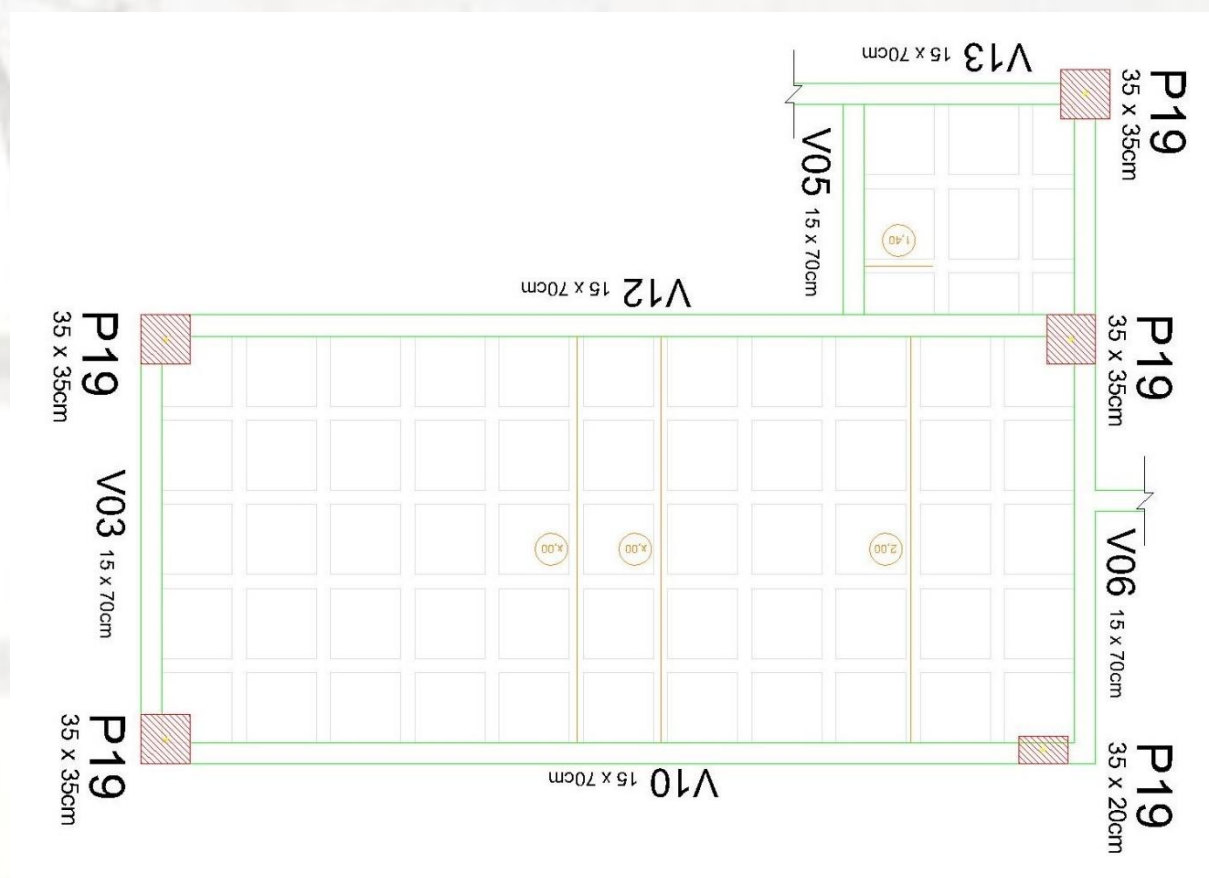




Figura 23 - Identificação dos pontos de fissuração e medidas das suas aberturas (lajes da escada e do auditório).



Figura 24 – Fissuras em lajes e vigas nas áreas do auditório e escada.

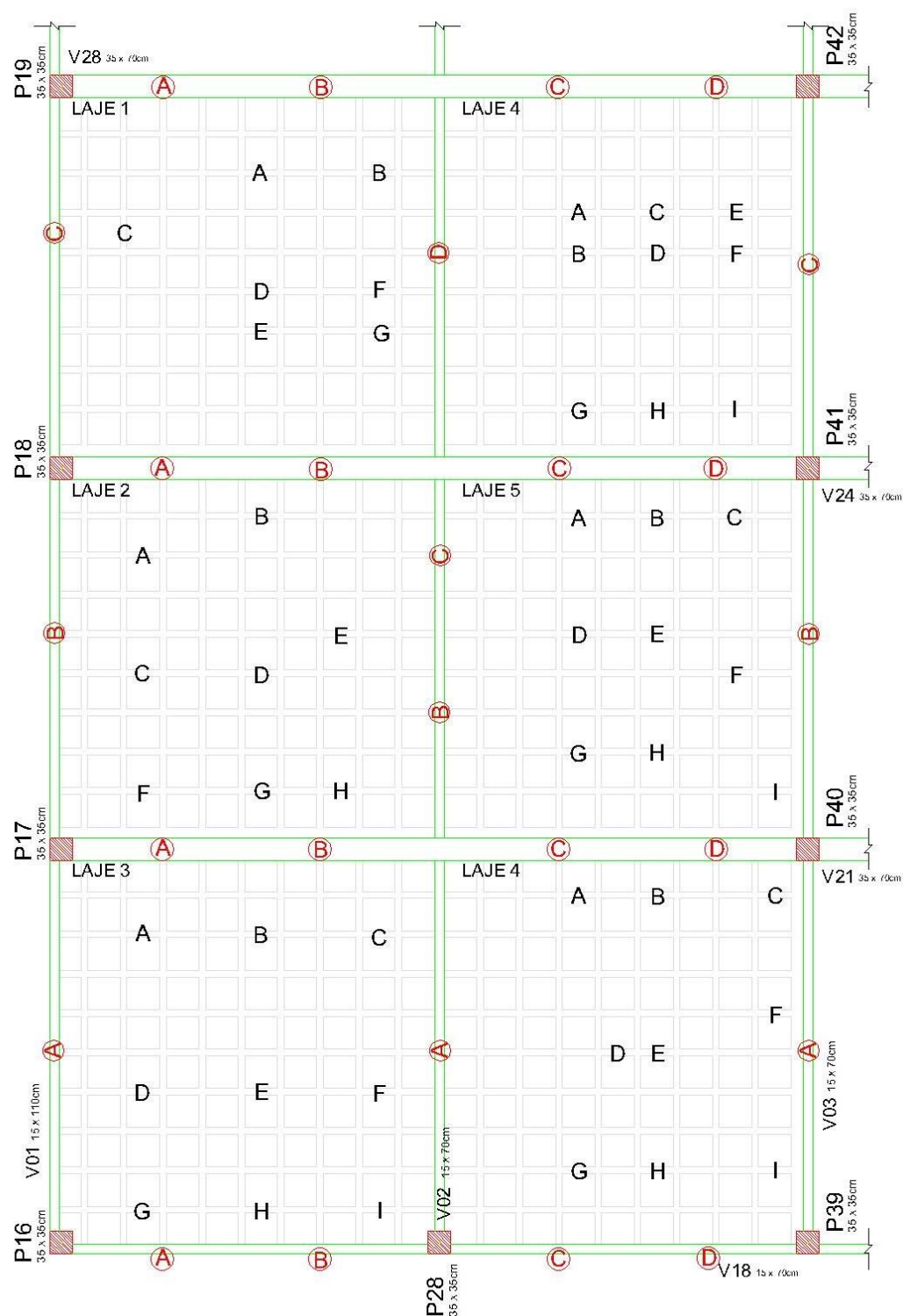
4.3 Esclerometria e ultrassom

Os ensaios de esclerometria e ultrassom foram utilizados para verificar a uniformidade e a qualidade do concreto empregado na execução das lajes objeto de inspeção do presente laudo.

4.3.1 *Esclerometria*

As medidas referentes ao ensaio de esclerometria foram realizadas nos pontos indicados na Figura 25. Seguindo metodologia descrita no item 3.3.

ESCLEROMETRIA



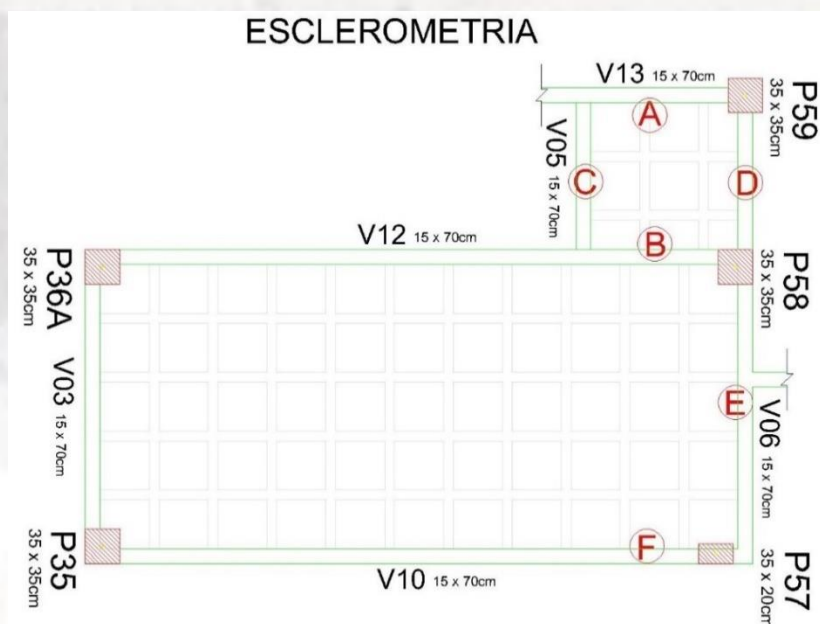


Figura 25 – Pontos onde foram realizados os ensaios de esclerometria.

Os resultados dos ensaios de esclerometria são apresentados nas Tabelas 8 e 9, que se referem a medidas realizadas em lajes e vigas do auditório e escada, respectivamente. Com base nesses resultados observa-se uma boa uniformidade do concreto, com valores médios de índice esclerométrico variando entre 39,9 e 42,6 (valores corrigidos), com coeficientes de variação não superiores a 8 %. Cabe aqui destacar que todas essas medidas foram tomadas em concretos moldados in loco. Devido à baixa espessura dos concretos pré-fabricados e presença das armaduras, não foi possível de realização desse ensaio nesse material.

Tabela 2 – Resultados de esclerometria para lajes e vigas do auditório.

LAJE 1					
Ponto de medida	IE	IE_{corrigido}	CV(%)	n	fcj estimado (MPa)
A	44,9	38,1	7,09	15	36,2
B	50,3	42,7	5,41	16	45,4
C	49,6	42,1	4,86	14	44,2
D	47,4	40,3	5,17	10	40,5
E	48,6	41,3	6,79	14	42,4
F	43,6	37,0	5,74	12	34,2
G	44,2	37,6	6,01	10	35,1
H	47,3	40,2	7,51	16	40,3
Valores médios	47,0	39,9	7,84	107	39,7

LAJE 2					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj estimado (MPa)
A	48,1	40,9	5,23	16	41,6
B	48,8	41,5	5,29	16	42,8
C	50,6	43,0	4,50	16	46,0
D	51,0	43,3	5,15	16	46,7
E	49,5	42,1	4,46	16	44,1
F	51,1	43,4	4,50	16	47,0
G	49,9	42,4	5,75	16	44,8
H	51,2	43,5	5,73	16	47,1
Valores médios	50,0	42,5	5,42	128	45,0

LAJE 3					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj estimado (MPa)
A	51,4	43,7	5,20	16	47,4
B	48,9	41,6	4,12	16	43,1
C	50,2	42,7	6,07	16	45,4
D	50,1	42,6	6,00	16	45,1
E	46,0	39,1	5,17	16	38,0
F	47,9	40,7	6,48	16	41,2
G	49,2	41,8	4,97	16	43,5
H	49,6	42,1	7,00	16	44,2
I	47,7	40,5	4,90	16	40,9
Valores médios	49,0	41,6	6,24	128	43,2

LAJE 4					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj estimado (MPa)
A	47,4	40,3	6,68	16	40,3
B	49,4	42,0	5,58	16	43,8
C	50,2	42,7	5,15	16	45,3
D	49,3	41,9	6,37	16	43,7
E	52,8	44,9	5,10	16	50,2
F	48,7	41,4	6,15	16	42,7
G	52,4	44,5	5,92	16	49,3
H	50,9	43,3	5,76	16	46,7
I	50,1	42,6	5,90	16	45,2
Valores médios	50,1	42,6	6,54	128	45,2

LAJE 5					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj _{estimado} (MPa)
A	46,1	39,2	5,41	16	38,2
B	48,0	40,8	5,81	16	41,4
C	48,6	41,3	6,82	16	42,5
D	47,4	40,3	6,49	16	40,4
E	45,2	38,4	6,43	16	36,7
F	49,5	42,1	5,36	16	44,0
G	48,1	40,9	6,71	16	41,6
H	48,0	40,8	5,71	16	41,4
I	47,1	40,0	5,76	16	39,9
Valores médios	47,5	40,4	6,41	128	40,6

LAJE 6					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj _{estimado} (MPa)
A	49,6	42,2	7,22	16	44,3
B	48,8	41,5	5,85	16	42,8
C	46,9	39,9	6,26	16	39,6
D	46,9	39,9	7,05	16	39,5
E	48,5	41,2	6,61	16	42,2
F	50,4	42,8	3,99	16	45,7
G	48,5	41,2	4,50	16	42,2
H	46,5	39,5	2,86	16	38,8
I	48,7	41,4	5,02	16	42,7
Valores médios	48,3	41,1	6,06	128	42,0

VIGA 1					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj _{estimado} (MPa)
A	51,6	43,9	4,52	16	47,9
B	51,0	43,4	6,72	16	46,8
C	50,0	42,5	5,66	14	45,0
Valores médios	50,9	43,2	5,72	46	46,5

VIGA 2					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fcj _{estimado} (MPa)
A	46,0	39,1	5,93	15	38,0
B	52,7	44,8	3,42	15	49,9
C	42,7	36,3	5,69	14	32,8
D	52,1	44,3	3,03	15	48,7

Valores médios	48,5	41,1	9,67	59	42,1
-----------------------	-------------	-------------	-------------	-----------	-------------

VIGA 3					
Ponto de medida	IE	IE_{corrigido}	CV(%)	n	fcj_{estimado}(MPa)
A	44,1	37,5	4,81	11	35,0
B	46,1	39,2	5,59	16	38,3
C	44,3	37,6	4,47	15	35,2
Valores médios	44,9	38,1	5,35	42	36,1

VIGA 18					
Ponto de medida	IE	IE_{corrigido}	CV(%)	n	fcj_{estimado} (MPa)
A	48,3	41,0	4,92	15	41,9
B	44,9	38,1	5,16	14	36,2
C	44,0	37,4	5,95	15	34,8
D	47,0	40,0	4,66	16	39,7
Valores médios	46,1	39,1	6,24	60	38,1

VIGA 21					
Ponto de medida	IE	IE_{corrigido}	CV(%)	n	fcj_{estimado} (MPa)
A	50,6	43,0	4,94	16	46,1
B	52,9	45,0	4,70	16	50,4
C	45,9	39,0	3,18	14	37,8
D	49,9	42,4	5,77	15	44,7
Valores médios	50,0	42,3	6,91	61	44,6

VIGA 24					
Ponto de medida	IE	IE_{corrigido}	CV(%)	n	fcj_{estimado} (MPa)
A	53,9	45,8	5,09	16	52,3
B	52,1	44,3	4,95	15	48,7
C	48,4	41,2	7,23	14	42,2
D	47,1	40,0	7,87	13	39,9
Valores médios	50,6	42,8	7,95	58	45,6

VIGA 28					
Ponto de medida	IE	IE_{corrigido}	CV(%)	n	fcj_{estimado} (MPa)
A	51,8	44,0	4,93	13	48,2
B	49,7	42,3	6,77	15	44,5
C	50,7	43,1	5,10	15	46,2
D	50,8	43,1	6,42	16	46,3
Valores médios	50,7	43,1	5,90	59	46,3

Tabela 3 – Resultados de esclerometria para vigas da escada.

VIGA 1 ESCADA					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fc _{estimado} (MPa)
A	44,7	38,0	4,69	15	35,9

VIGA 2 ESCADA					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fc _{estimado} (MPa)
A	43,7	37,1	6,95	13	34,3

VIGA 3 ESCADA					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fc _{estimado} (MPa)
A	43,8	37,2	5,25	15	34,4

VIGA 4 ESCADA					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fc _{estimado} (MPa)
A	43,7	37,2	5,63	14	34,4

VIGA 5 ESCADA					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fc _{estimado} (MPa)
A	45,7	38,8	5,89	13	37,5

VIGA 6 ESCADA					
Ponto de medida	IE	IE _{corrigido}	CV(%)	n	fc _{estimado} (MPa)
A	39,4	33,5	4,18	10	27,9

Nas Tabelas 2 e 3, IE corresponde ao índice esclerométrico obtido conforme medido em campo; IE_{corrigido} corresponde ao índice esclerométrico corrigido em função da calibração do equipamento, bem como uma redução do valor original em função da carbonatação do concreto (neste caso adotou-se 15 %); CV corresponde ao coeficiente de variação decorrente do conjunto de valores para cada ponto de medida; n corresponde ao número de medidas em cada ponto após o tratamento dos resultados, conforme descrito no item 3.3; fc_{estimado} corresponde a uma estimativa de resistência do concreto.

Cumpra aqui esclarecer que a estimativa de resistência apresentada se baseou em correlação específica proposta por ARAÚJO (2018), que estudou este tipo de correlação para concretos locais (João Pessoa) empregando o mesmo tipo de equipamento. Mesmo esse tipo de estimativa devendo ser vista

com cautela, em função das limitações do ensaio, os resultados apresentados tem boa proximidade com aqueles obtidos no controle tecnológico (entre 33,3 e 37,5 MPa aos 28 dias, conforme relatórios fornecidos pelo setor de engenharia do TRE), quando são comparados em bases temporais semelhantes.

4.3.2 Ultrassom

Os resultados dos ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica (ultrassom) são apresentados na Tabela 4 e se referem a medidas realizadas em lajes e vigas do auditório. A Figura 26 identifica os pontos onde as medidas foram tomadas.

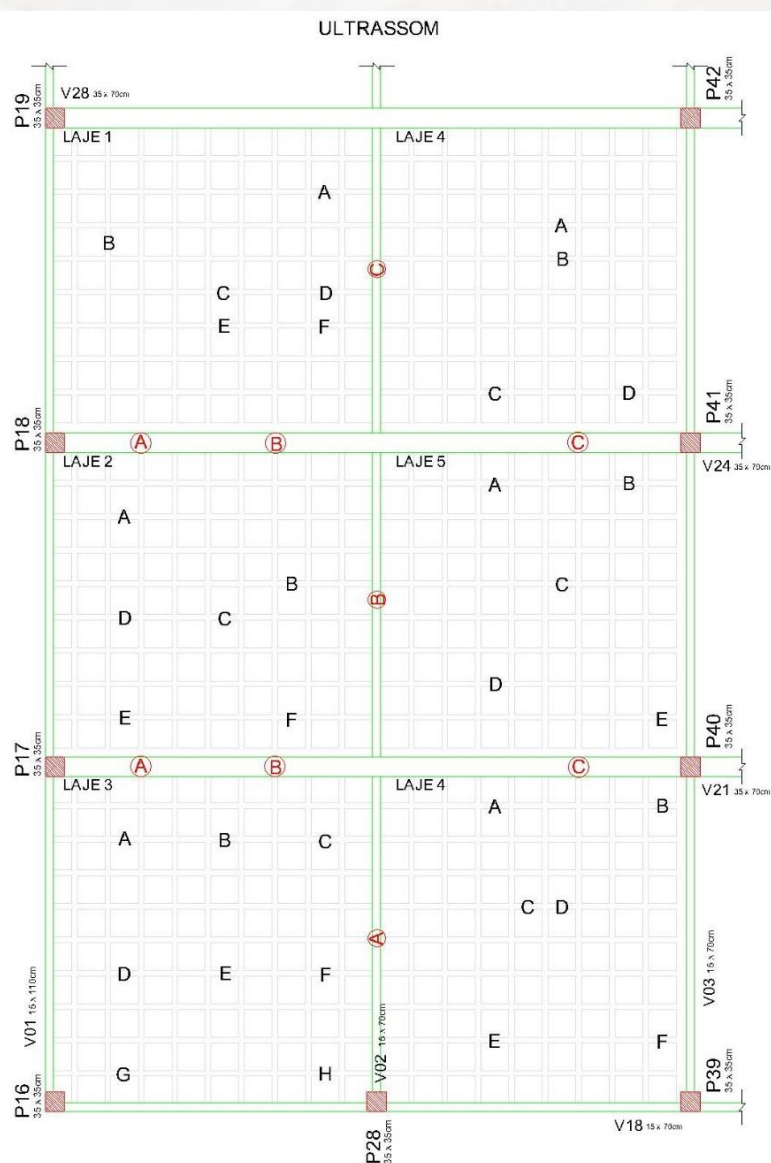


Figura 26 – Pontos de realização das medidas de ultrassom.

Tabela 4 – Resultados do ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico em lajes e vigas

do auditório.

LAJE 1				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	5028,3	11,19	6	Excelente
B	3924,5	1,10	6	Boa
C	4360,3	1,10	6	Boa
D	4282,9	12,26	6	Boa
E	4284,6	1,37	6	Boa
F	4491,0	16,22	6	Boa
Valores médios	4395,3	22,74	36	Boa

LAJE 2				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	5268,6	18,15	6	Excelente
B	3295,2	0,83	6	Aceitável
C	4444,0	0,45	6	Boa
D	3660,9	27,04	6	Boa
E	3269,0	2,89	6	Aceitável
F	4464,0	0,45	6	Boa
Valores médios	4066,9	24,58	36	Boa

LAJE 3				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	4005,9	11,45	6	Boa
B	4406,3	1,97	6	Boa
C	4857,3	0,51	6	Excelente
D	4429,8	1,63	6	Boa
E	4104,1	1,83	6	Boa
F	4340,6	1,90	6	Boa
G	4003,1	1,61	6	Boa
H	6112,1	2,31	6	Excelente
Valores médios	4532,4	13,53	48	Excelente

LAJE 4				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	4669,2	1,00	6	Excelente
B	5791,7	14,02	6	Excelente
C	4589,6	1,09	6	Excelente
D	4685,0	2,19	6	Excelente
Valores médios	4933,9	12,73	24	Excelente

LAJE 5				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	4709,3	25,77	6	Excelente
B	5596,7	18,15	6	Excelente
C	4523,5	0,00	6	Excelente
D	4606,5	0,00	6	Excelente
E	4258,3	0,00	6	Boa
Valores médios	4738,9	13,06	30	Excelente

LAJE 6				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	5107,8	14,33	6	Excelente
B	3837,2	4,38	6	Boa
C	4497,7	3,23	6	Boa
D	4559,0	1,44	6	Excelente
E	4425,4	11,48	6	Boa
F	5323,5	1,38	6	Excelente
Valores médios	4625,1	12,93	36	Excelente

VIGA 2				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	3780,7	0,29	6	Boa
B	3531,7	0,50	6	Aceitável
C	3538,7	0,61	6	Aceitável
Valores médios	3617,0	3,09	18	Boa

VIGA 21				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	3874,4	1,91	6	Boa
B	4140,8	0,77	6	Boa
C	3608,0	7,06	6	Boa
Valores médios	3874,4	7,55	18	Boa

VIGA 24				
Ponto de medida	V (m/s)	CV(%)	n	Classificação
A	4112,1	0,47	6	Boa
B	4168,8	1,54	6	Boa
C	4055,3	0,58	6	Boa
Valores médios	4112,1	1,63	18	Boa

Na Tabela 4, “V” corresponde à velocidade de propagação do pulso ultrassônico; “CV”

corresponde ao coeficiente de variação decorrente do conjunto de valores para cada ponto de medida; “n” corresponde ao número de valores obtidos em cada ponto de medida.

Os resultados indicam velocidades médias de propagação do pulso ultrassônico entre 4.067 e 4.934 m/s para as lajes analisadas e entre 3.617 e 4112 m/s para as vigas analisadas. Isto, de acordo com a classificação proposta por Cánovas (1994), significa concretos de boa a excelente qualidade para as lajes e concretos de boa qualidade para as vigas, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação da qualidade do concreto de acordo com a velocidade de propagação do pulso ultrassônico.

Velocidade de propagação do pulso ultrassônico (m/s)	Qualidade do concreto
> 4.500	Concreto de qualidade excelente
Entre 3.600 e 4.500	Concreto de qualidade boa
Entre 3.000 e 3.600	Concreto de qualidade aceitável
Entre 2.100 e 3.000	Concreto de qualidade ruim
< 2.100	Concreto de qualidade muito ruim

No que se refere à estimativa de resistência, não se empregou essa opção em função de inexistirem correlações atualizadas obtidas com concretos da região.

No que se refere à uniformidade do concreto, percebe-se que o concreto apresenta boa uniformidade, com coeficientes de variação relativamente baixos para cada elemento estrutural e valores médios de propagação da onda ultrassônica variando relativamente pouco de um componente estrutural para outro.

4.4 Presença de cloretos

Foram analisadas cinco amostras de concreto retiradas da laje do auditório para verificar se houve algum tipo de contaminação prévia do concreto com cloretos, uma vez que a obra analisada não se encontra em área de influência marinha. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 6 e indicam baixas concentrações de cloretos totais, com valores bem abaixo do mínimo estabelecido pela normalização vigente (0,15 % em relação à massa de cimento – ver Quadro 6). Desta forma, conclui-se que não houve contaminação prévia do concreto com cloretos e que este não é um fator relevante da

ativação das armaduras de concreto identificadas no presente laudo.

Tabela 6 - Concentração de cloretos nas amostras de concreto obtidas nas lajes e vigas do auditório

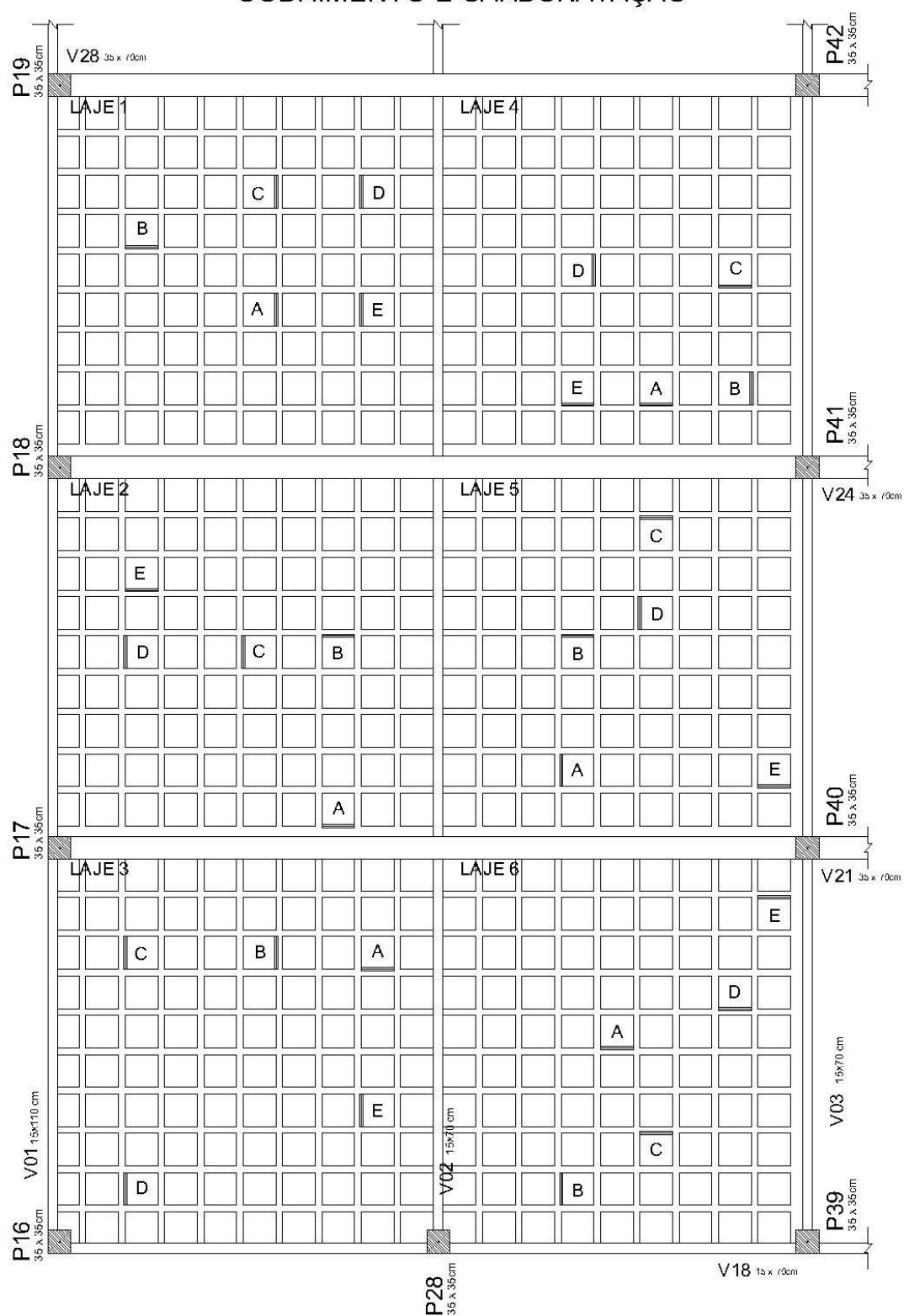
Elemento estrutural	Teor de cloretos totais (% massa de cimento)
Laje 1	0,055
Laje 2	0,068
Viga 18	0,040
Viga 24	0,080
Viga 28	0,083

4.5 Profundidade de carbonatação e cobrimento

As medidas da profundidade de carbonatação e de cobrimento das armaduras em lajes foram realizadas nos pontos indicados na Figura 27.



COBRIMENTO E CARBONATAÇÃO



COBRIMENTO E PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

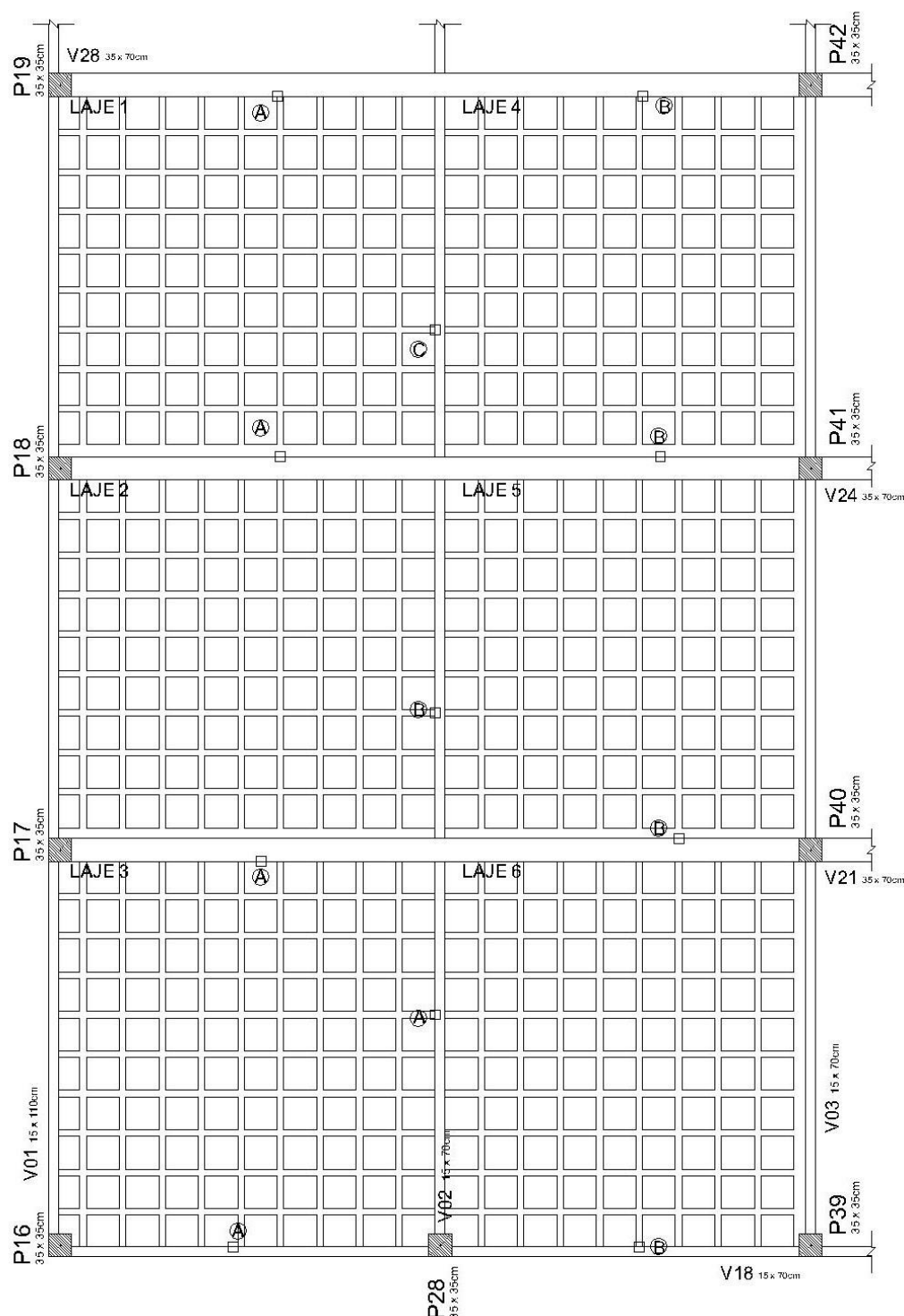


Figura 27 – Pontos de medição da profundidade de carbonatação e espessura da capa de cobrimento (lajes e vigas da escada, lajes do auditório e vigas do auditório).

Os resultados sobre a espessura da camada de cobrimento e a profundidade da frente carbonatada em lajes são apresentados na Tabela 7. Os resultados indicam que a profundidade carbonatada é sempre superior à espessura da capa de cobrimento, o que justifica a quantidade de pontos com a presença de sinais externos de corrosão, inclusive com várias áreas fissuradas e desprendimentos da capa de cobrimento.

Em vários casos, a profundidade carbonatada corresponde a mais de duas vezes a espessura da capa de cobrimento. Esse comportamento se reproduz tanto na laje de cobertura do auditório como na laje de cobertura da escada.

Tabela 7 – Medidas da profundidade de carbonatação do concreto e de cobrimento das armaduras.

LAJE 1					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	11,3	18,8	12,9	25,6	Sem corrosão aparente
B	9,2	29,6	29,4	6,0	Sem corrosão aparente
C	10,5	6,4	28,9	9,4	Sem corrosão aparente
D	10,8	3,8	28,1	10,4	Sem corrosão aparente
E	-	-	23,9	20,6	Sem corrosão aparente
Valores médios	10,5	16,3	24,7	28,3	

LAJE 2					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	16	15	22	16	Sem corrosão aparente
B	12	36	35	10	Com corrosão aparente
C	10	14	21	22	Sem corrosão aparente
D	10	20	22	67	Com corrosão aparente
E	14	11	27	21	Com corrosão aparente
Valores médios	12,4	26,2	25,2	33,2	

LAJE 3					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	12,1	6,0	30,0	5,7	Com corrosão aparente
B	10,3	3,4	25,6	8,1	Sem corrosão aparente
C	10,6	5,7	26,9	25,2	Com corrosão aparente
D	10,2	5,2	25,9	11,1	Sem corrosão aparente
E	17,6	9,3	30,6	8,9	Com corrosão aparente
Valores médios	12,1	24,6	27,8	13,7	

LAJE 4					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	9,8	19,1	25,8	6,5	Com corrosão aparente
B	9,5	6,4	23,9	4,7	Sem corrosão aparente
C	12,1	1,0	27,6	13,5	Sem corrosão aparente
D	32,2	10,1	24,9	10,9	Sem corrosão aparente
E	13,8	16,4	22,5	10,5	Com corrosão aparente
Valores médios	15,5	58,0	22,5	61,6	

LAJE 5					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	10,2	8,0	26,8	9,9	Sem corrosão aparente
B	10,8	5,8	28,7	3,5	Com corrosão aparente
C	13,4	5,2	28,2	21,2	Com corrosão aparente
D	13,5	7,2	25,2	2,9	Sem corrosão aparente
E	16,0	3,6	30,0	13,5	Sem corrosão aparente
Valores médios	12,8	17,7	27,8	12,2	

LAJE 6					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	14,2	11,0	16,4	6,7	Com corrosão aparente
B	8,3	11,5	27,7	3,6	Com corrosão aparente
C	10,3	7,8	25,9	24,9	Com corrosão aparente
D	10,7	23,8	7,1	10,2	Sem corrosão aparente
E			8,6	35,9	Sem corrosão aparente
Valores médios	10,9	24,1	17,1	53,9	

LAJE DA ESCADA					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A	12,7	8,4	30,7	4,4	Sem corrosão aparente
B	5,6	23,4	27,1	7,2	Com corrosão aparente
Valores médios	9,2	43,7	28,9	8,5	

Cabe aqui ressaltar que, mesmo não sendo identificada corrosão aparente visualmente em todos os pontos (aproximadamente 50 %), o fato da profundidade carbonatada ser sempre superior a espessura da capa de cobrimento contribui para que se verifique um amplo quadro de corrosão detectado nas lajes, conforme se observam nas medidas de potencial de corrosão (ver seção 4.7).

Avaliando a velocidade de avanço da frente de carbonatação, com base na Equação 1, verificam-se valores significativamente elevados (Tabela 8). Esse comportamento, em princípio incompatível com a avaliação do concreto, deve ser ponderado em função do seguinte aspecto. Tanto as treliças como as plaquetas empregadas possuíam uma capa de concreto pré-fabricado da ordem de 25 mm de espessura. O concreto dessa camada pré-fabricada tem características claramente diferentes do concreto executado em obra. Isso pode ser verificado em função da facilidade com que esse concreto se rompe com o seu manuseio, quando foram removidas capas de concreto para a realização de ensaios aqui apresentados.

Tabela 8 - Velocidade de avanço da frente de carbonatação nas lajes inspecionadas

Laje	Tempo de exposição (anos)	Velocidade de avanço da frente de carbonatação (mm/ano ^{0,5})
1	19,75	5,6
2		5,7
3		6,3
4		5,1
5		6,3
6		3,9
Escada		6,5

Nesse sentido, o que provavelmente ocorreu foi uma rápida carbonatação do concreto pré-fabricado e um avanço mais lento da carbonatação no concreto moldado *in loco*. Isso se comprova quando comparam-se as profundidades de carbonatação nas nervuras das lajes e nas vigas, conforme se apresenta na seção 4.5.2.

A Figura 28 mostra exemplos de profundidades de carbonatação significativamente mais profundas que a capa de cobrimento das armaduras.





Figura 28 – Profundidade carbonatada x capa de cobrimento da armadura em lajes.

Outro aspecto a ser destacado na estrutura das lajes é que, em vários pontos, o componente de projeto pré-fabricado, denominado de plaqueta, apresentou descolamento da massa de concreto moldado *in loco* (Figura 29). Isso pode ter acontecido em consequência da fissuração decorrente do processo de corrosão instalado na armadura subjacente à plaqueta ou pela má aderência entre as camadas de concreto, uma vez que não se verificou qualquer tratamento para melhorar a aderência entre o concreto pré-fabricado e o concreto moldado *in loco*.

Independente da causa que levou a essa condição, esse processo seguramente acelerou o avanço da frente de carbonatação, inclusive abrindo fissuras laterais para que esse processo atingisse, de forma mais rápida, as camadas de concreto mais próximas à armadura.





Figura 29 – Descolamento na interface entre o concreto pré-fabricado e o concreto moldado *in loco*.

4.5.2 Avaliação em vigas

Os resultados sobre a espessura da camada de cobrimento e a profundidade da frente de carbonatação em vigas são apresentados na Tabela 8. Os resultados indicam que a profundidade carbonatada é sempre inferior à espessura da capa de cobrimento, o que justifica o grau de preservação das vigas, sem a presença de sinais externos de corrosão. Em apenas um ponto observou-se um sinal leve de corrosão e limitado à armadura transversal

Em vários casos, a profundidade carbonatada corresponde a menos da metade da espessura da capa de cobrimento. Esse comportamento se reproduz tanto nas vigas do auditório como nas vigas da escada.

Tabela 8 – Medidas da profundidade de carbonatação do concreto e de cobrimento das armaduras em vigas.

VIGA 02					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A (estribo)	13,4	8,6	6,6	25,4	Sem corrosão aparente
B (arm.long.)	21,2	5,2	12,8	10,2	Sem corrosão aparente
C (arm.long.)	26,1	5,0	13,4	10,1	Sem corrosão aparente

VIGA 18					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A (estribo)	11,1	5,8	6,8	14,9	Sem corrosão aparente
B (arm. long.)	24,9	0,6	10,7	11,9	Sem corrosão aparente

VIGA 21					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A (estribo)	16,5	2,7	11,0	14,9	Sem corrosão aparente
B (arm. long.)	22,2	1,8	11,0	14,9	Sem corrosão aparente
B (estribo)	21,6	1,9	10,7	10,7	Sem corrosão aparente

VIGA 24					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A (estribo)	13,8	2,2	11,1	12,8	Sem corrosão aparente
B (arm. long.)	27,3	2,6	14,9	21,6	Sem corrosão aparente

VIGA 28					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A (estribo)	11,7	7,3	9,5	10,6	Com corrosão aparente
B (arm. long.)	13,6	4,8	9,2	40,0	Sem corrosão aparente

VIGAS DA ESCADA					
Ponto de medida	Cobrimento (mm)	CV(%)	Prof carbonatada (mm)	CV(%)	Observações
A (estribo)	23,8	2,3	13,4	21,7	Sem corrosão aparente
B (arm. long.)	13,4	6,2	4,6	37,8	Sem corrosão aparente

Avaliando-se o conjunto das vigas inspecionadas, observa-se que os cobrimentos dos estribos se situaram na ordem de 16 mm. Valor este acima do especificado em projeto, mas significativamente inferior ao que se exigia na época (20 mm) e substancialmente menor ao que a normalização exige

hoje (30 mm). Mesmo assim, como o concreto das vigas é de boa qualidade frente ao fenômeno da carbonatação, a profundidade média carbonatada foi da ordem de 10,5 mm. Valor este que, apesar de se aproximar do cobrimento das armaduras transversais, representa uma baixa velocidade de avanço da frente de carbonatação. O valor médio da velocidade de avanço da frente de carbonatação observado nas vigas foi de 2,3 mm/ano^{0,5}. Valor este significativamente inferior àquele observado para as lajes.

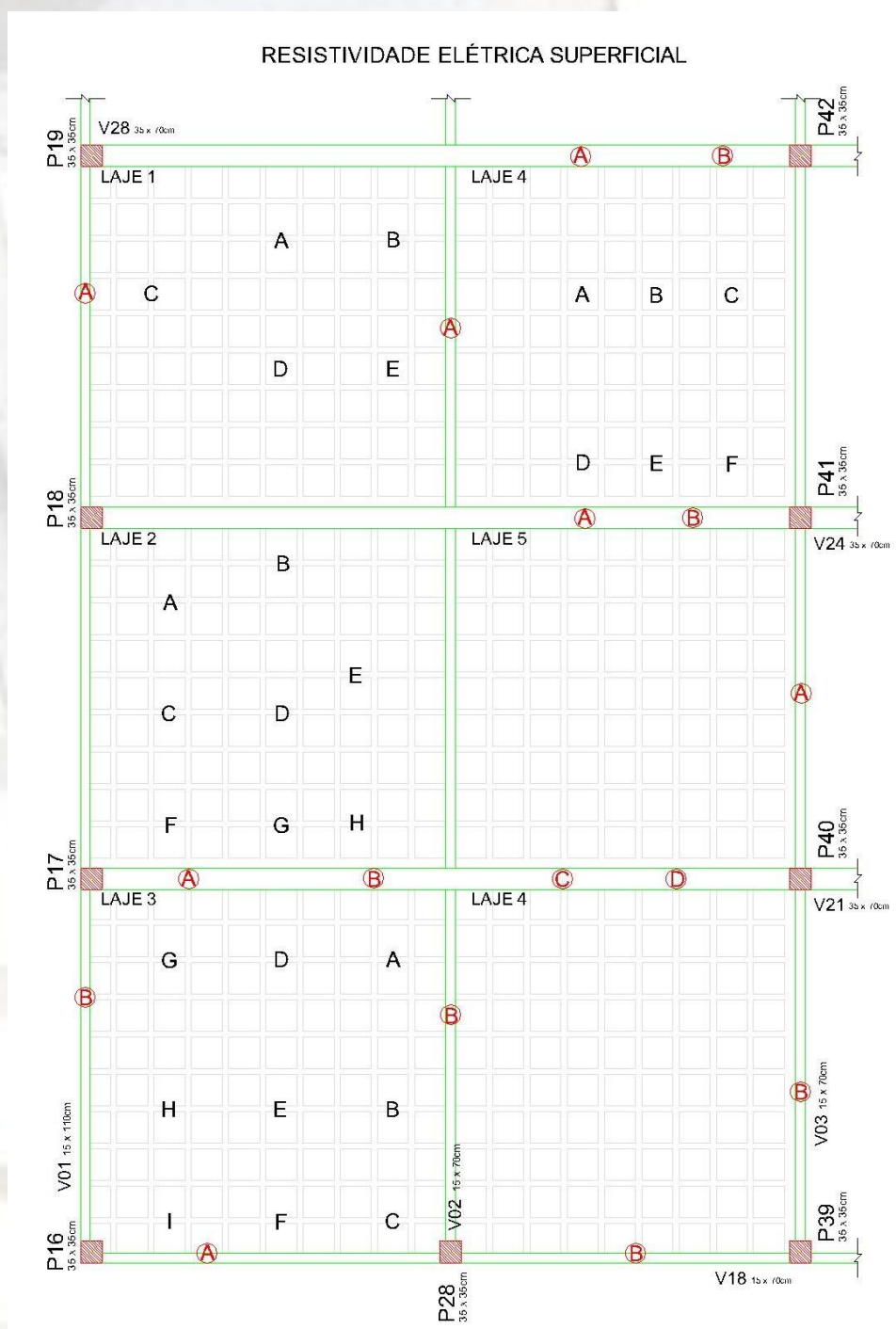
A Figura 30 ilustra as medidas da profundidade de carbonatação em vigas.



Figura 30 – Medidas da profundidade de carbonatação em vigas.

4.6 Resistividade elétrica superficial

A Figura 31 apresenta os pontos onde foram realizadas as medidas de resistividade elétrica superficial nas lajes e vigas do auditório e da escada. A Tabela 9 apresenta os resultados de resistividade elétrica superficial (RES) obtidos em medidas realizadas nas lajes e nas vigas do auditório e da área da escada.



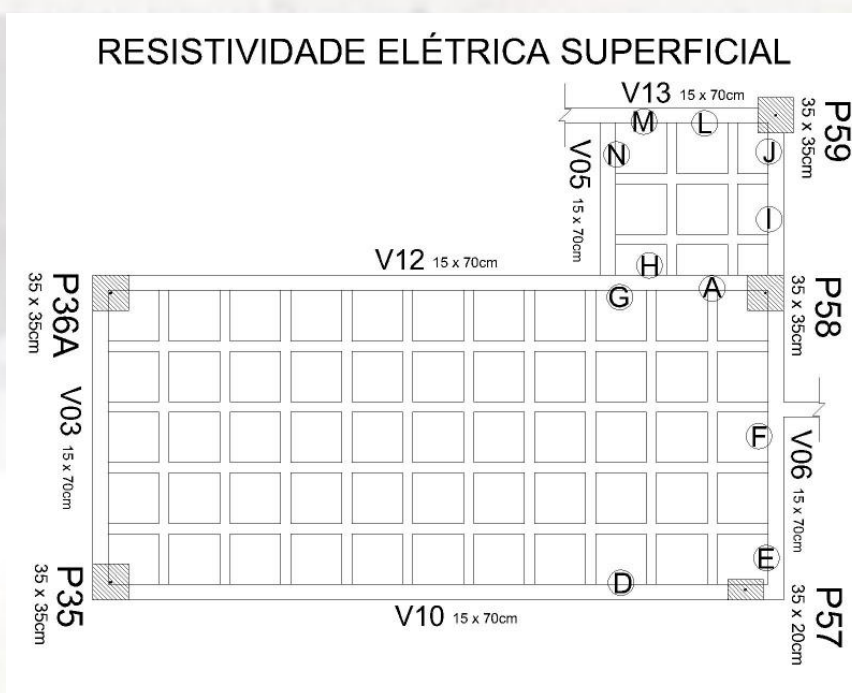


Figura 31 – Regiões onde foram realizadas as medidas de resistividade elétrica superficial.

Tabela 9 – Medidas de RES para lajes e vigas.

LAJE 1					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	22	14,6	27	17	8
B	33	18,4	39	19	8
C	36	67,2	81	14	8
D	17	39,1	28	10	12
E	22	21,6	29	16	12
Valores médios	25	51,5	81	10	48

LAJE 2					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	16	20,9	22	11	8
B	29	58,2	54	11	8
C	23	27,2	37	16	8

D	13	33,9	21	8	8
E	32	39,8	44	14	8
F	29	52,7	58	13	8
G	24	31,0	32	13	8
H	24	52,8	58	8	8
Valores médios	24	52,8	58	8	64

LAJE 3					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	26	55	47	14	8
B	26	46	46	13	8
C	46	15	56	38	8
D	54	44	88	28	8
E	34	32	51	19	8
F	40	24	54	21	8
G	47	56	89	23	8
H	48	36	72	22	8
I	45	26	69	28	8
Valores médios	41	44	89	13	72

LAJE 4					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	18	21,5	25	14	12
B	18	26,0	27	11	12
C	28	46,0	52	10	12
D	19	34,8	33	11	8
E	19	31,8	26	8	8
F	32	21,8	41	22	8
Valores médios	22	41,0	52	8	60

LAJE 5					
Ponto de medida	Resistividade média (k Ω .cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (k Ω .cm)	Resistividade Mínima (k Ω .cm)	n
A	22	33,3	32	10	8
B	23	39,4	36	11	8
C	18	59,1	35	8	8
D	19	24,8	28	12	8
E	19	25,7	25	11	8
F	36	31,1	55	24	8
G	24	38,0	39	8	8
H	29	19,3	40	22	8
I	33	43,5	61	13	8
Valores médios	25	42,5	61	8	72

LAJE 6					
Ponto de medida	Resistividade média (k Ω .cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (k Ω .cm)	Resistividade Mínima (k Ω .cm)	n
A	28	73,5	72	8	8
B	36	44,5	63	21	8
C	57	46,2	97	26	8
D	21	20,8	27	14	8
E	27	56,5	60	14	8
F	42	21,1	51	27	8
G	32	36,4	54	20	8
H	55	54,9	105	19	8
I	56	37,7	90	28	8
Valores médios	39	55,9	105	8	72

VIGA 1					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	167	19,8	215	143	8
B	578	10,1	625	513	8
Valores médios	343	65,1	625	143	16

VIGA 2					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	449	18,3	532	368	8
B	428	24,2	544	312	8
Valores médios	436	20,7	544	312	16

VIGA 3					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	564	20,0	652	437	8
B	526	20,1	621	412	8
Valores médios	545	18,3	652	412	16

VIGA 18					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	526	20,1	633	422	8
B	596	17,3	692	487	8
Valores médios	561	18,0	692	422	16

VIGA 21					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	552	31,3	780	350	8
B	336	25,6	426	203	8
C	632	16,6	743	535	8

D	386	16,1	445	321	8
Valores médios	470	35,5	780	203	3 2

VIGA 24					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	226	37,2	317	152	8
B	222	22,0	254	166	8
Valores médios	224	27,4	317	152	1 6

VIGA 28					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	244	12,0	266	193	8
B	304	31,7	488	207	8
Valores médios	276	27,9	488	193	1 6

VIGAS DA ESCADA					
Ponto de medida	Resistividade média (kΩ.cm)	CV(%)	Resistividade Máxima (kΩ.cm)	Resistividade Mínima (kΩ.cm)	n
A	1541	12,6	1712	1330	8
B	1529	15,6	1713	1259	8
C	1371	5,0	1434	1289	8
D	1546	21,0	1916	1312	8
E	1690	21,3	1986	1290	8
F	1395	31,0	1894	1126	8
G	1657	10,2	1791	1467	8
H	1609	22,4	1924	1217	8
I	1634	20,9	1976	1292	8
J	1735	10,2	1927	1578	8
K	1527	20,2	1712	1172	8
Valores médios	1561	16,8	1986	1126	8 8

Os resultados indicam comportamentos bem distintos quando comparam-se os valores obtidos para lajes e os valores obtidos para as vigas. Essa diferença de comportamento pode estar atrelada a dois aspectos. O primeiro dele reflete o fato de que as medidas de resistividade elétrica superficial devem ser realizadas em elementos com espessura igual ou superior a 10 cm. No caso das lajes, a espessura das nervuras onde foram realizadas as medidas é de 10 cm, o que corresponde ao limite mínimo inferior recomendado na literatura e pode ter interferido na qualidade das medidas realizadas. O segundo aspecto refere-se ao fato de que as armaduras das lajes encontraram-se em processo de corrosão em uma grande parte das nervuras (local onde foram realizadas as medidas de resistividade), o que converge com medidas de resistividade elétrica mais baixas.

Assim, pode-se classificar as medidas de resistividade como indicativas de processo de corrosão moderado a elevado para a maioria das medidas realizadas em lajes e indicativas de risco de corrosão insignificante para praticamente todas os pontos de medida realizados em vigas, conforme explicita a classificação apresentada por CIGNA (2003), apresentada na seção 3.7.

É importante acrescentar que as medidas de RES são medidas que não devem ser tomadas de forma isolada. Pelo contrário, devem ser visualizadas sempre em conjunto com as demais medidas eletroquímicas, pois são fortemente influenciadas pelas condições de umidade do material.

4.7 Potencial de corrosão

As medidas de potencial de corrosão foram realizadas tanto em lajes como em vigas. Essas medidas são expressas em mapas de potencial apresentados nas Figuras 32 e 33 e na Tabela 10. A Figura 34 identifica os pontos de medição apresentados na Tabela 10. As medidas de potencial nas lajes foram realizadas na face inferior das nervuras, enquanto que as medidas de potencial nas vigas foram realizadas no fundo e nas laterais acessíveis.

Os resultados obtidos nas lajes indicam probabilidade de corrosão elevada ($\geq 90\%$) em áreas extensas das lajes do auditório (Figura 32). Exceção feita à laje 1, com menor região indicativa de elevada probabilidade de corrosão. Esse comportamento é corroborado pelos valores de carbonatação observados nas nervuras das lajes, que se demonstraram sempre superiores à espessura da capa de cobrimento. Esse comportamento se repete na laje da escada (Figura 33).

No que se refere às vigas, os potenciais de corrosão se situaram, principalmente, na faixa de baixa probabilidade de corrosão, com apenas poucos pontos na faixa de corrosão incerta (ver Tabela

10). Esse comportamento também é corroborado pelos valores de profundidade de carbonatação observados nas vigas, que foram sempre inferiores à espessura da capa de cobrimento.

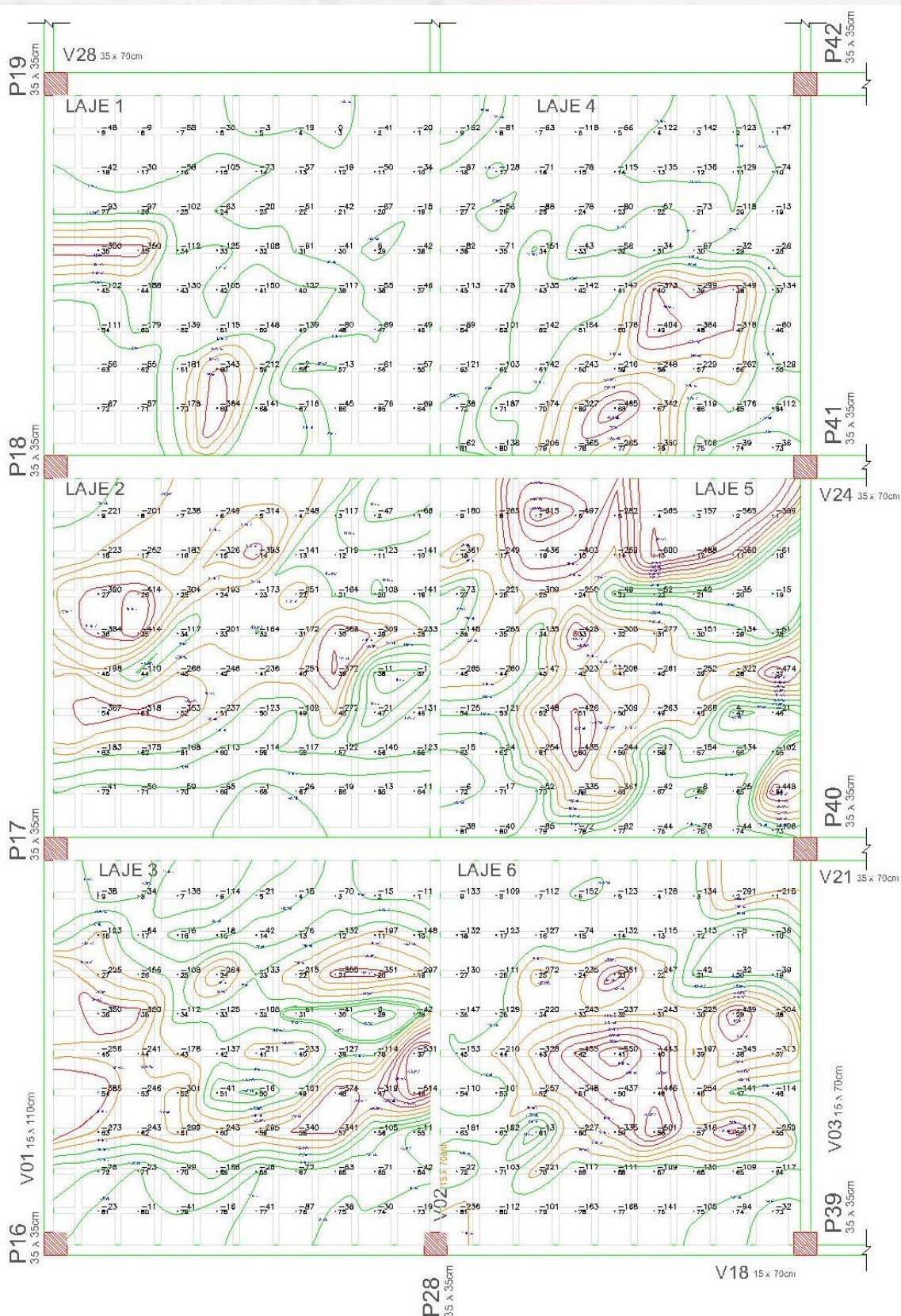


Figura 32 – Mapa de potenciais na laje do auditório - ESC.

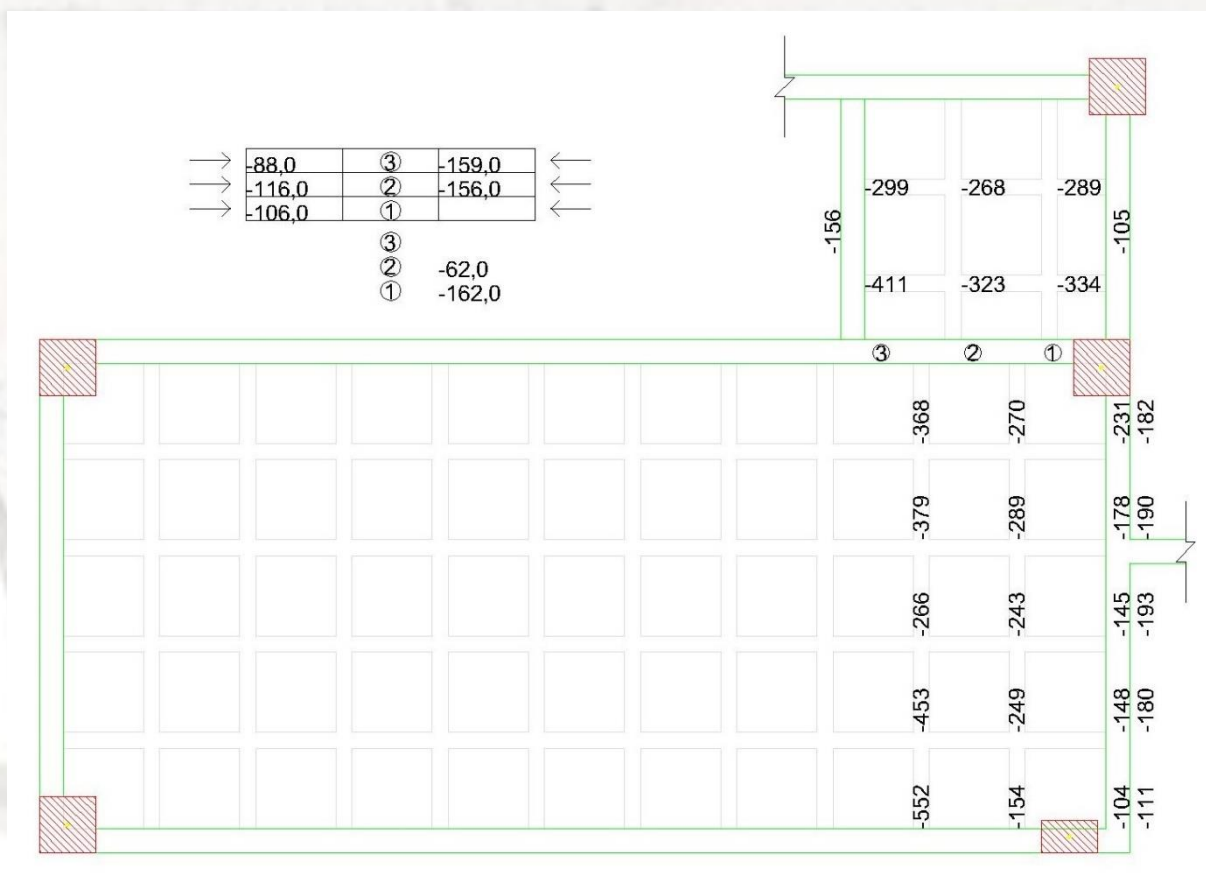


Figura 33 – Mapa de potenciais na laje e viga da escada - ESC.

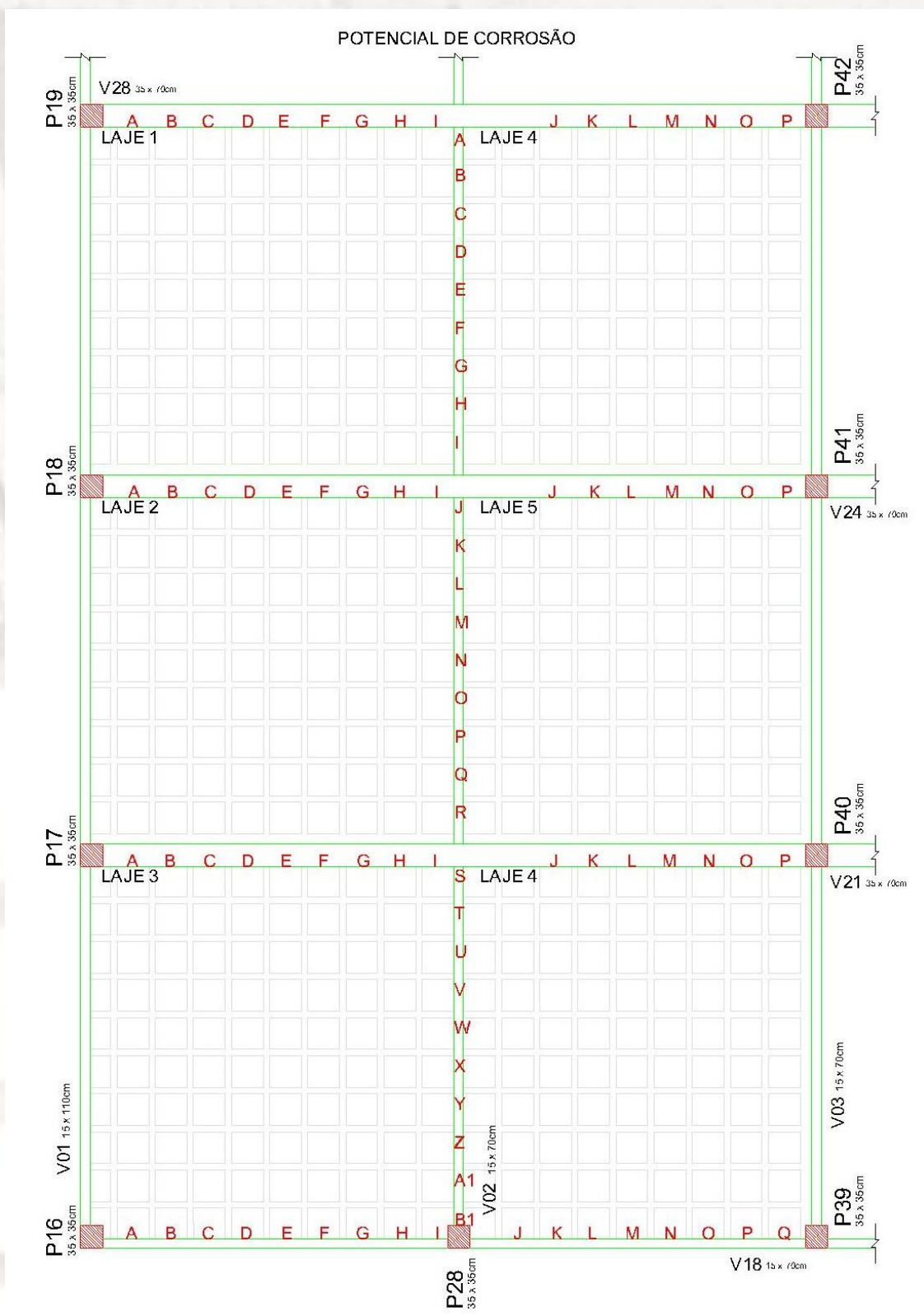


Figura 34 – Representação esquemática dos pontos onde foram realizadas as medidas de potencial de corrosão nas vigas do auditório.

Tabela 10 – Medidas de potencial de corrosão nas vigas do auditório (ESC).

VIGA 02										
Tramo 1										
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
Fundo	-104	-114	-109	-98	-108	-168	-125	-213	-112	
Lateral posterior	-165	-188	-198	-168	-179	-156	-166	-228	-156	
Lateral anterior	-153	-172	-182	-171	-181	-166	-173	-221	-159	
Tramo 2										
Ponto	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	
Fundo	-138	-134	-121	-131	-123	-149	-86	-94	-116	
Lateral posterior	-113	-118	-149	-131	-101	-150	-115	-128	-152	
Lateral anterior	-181	-105	-181	-166	-133	-130	-143	-177	-156	
Tramo 3										
Ponto	S	T	U	V	X	W	Y	Z	A1	B1
Fundo	-161	-188	-154	-148	-156	-149	-209	-174	-137	-108
Lateral posterior	-185	-203	-196	-181	-193	-209	-215	-146	-164	-157
Lateral anterior	-179	-188	-171	-169	-190	-227	-238	-155	-191	-150

VIGA 18									
Tramo 1									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Fundo	-185	-173	-167	-236	-109	-201	-126	-149	-111
Lateral frontal	-98	-126	-92	-100	-116	-128	-185	-119	-204
Tramo 2									
Ponto			J	K	L	M	N	O	P
Fundo				-140	-127	-93	-110	-128	-167
Lateral frontal		-118	-74	-104	-106	-109	-124	-107	-134

VIGA 21									
Tramo 1									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Fundo	-109	-88	-162	-168	-238	-163	-213	-200	-142

Lateral posterior	-102	-124	-173	-146	-116	-127	-118	-144	-108
Lateral anterior	-104	-147	-135	-119	-152	-124	-131	-172	-179
Tramo 2									
Ponto			J	K	L	M	N	O	P
Fundo				-121	-134	-93	-135	-166	-172
Lateral posterior			-128	-112	-123	-126	-138	-177	-141
Lateral anterior			-108	-106	-144	-110	-120	-106	-148

VIGA 24									
Tramo 1									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Fundo	-127	-128	-116	-164	-125	-164	-98	-211	-147
Lateral posterior	117	-165	-182	-150	-149	-127	-130	-153	-115
Lateral anterior	-130	-106	-125	-148	-117	-166	-114	-137	-116
Tramo 2									
Ponto			J	K	L	M	N	O	P
Fundo				-114	-118	-124	-119	-148	-147
Lateral posterior			-136	-168	-133	-188	-200	-172	-165
Lateral anterior			-109	-106	-98	-94	-133	-162	-144

VIGA 28									
Tramo 1									
Ponto	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Fundo	-119	-145	-151	-113	-180	-174	-131	-107	-166
Lateral frontal	-112	-122	-131	-123	-108	-153	-142	-158	-118
Tramo 2									
Ponto			J	K	L	M	N	O	P
Fundo				-119	-134	-132	-113	-120	-134
Lateral frontal			-110	-118	-131	-198	-174	-118	-112

4.8 Velocidade de corrosão

Cumpra aqui esclarecer que não foi possível a realização de medidas de densidade de corrente de corrosão nas lajes devido a impossibilidade de confinamento do sinal eletroquímico em peças de pequena espessura. Nesse sentido, os pontos de medidas de densidade de corrente de corrosão são apresentados na Figura 35. A Tabela 11 apresenta o resultado dessas medidas.

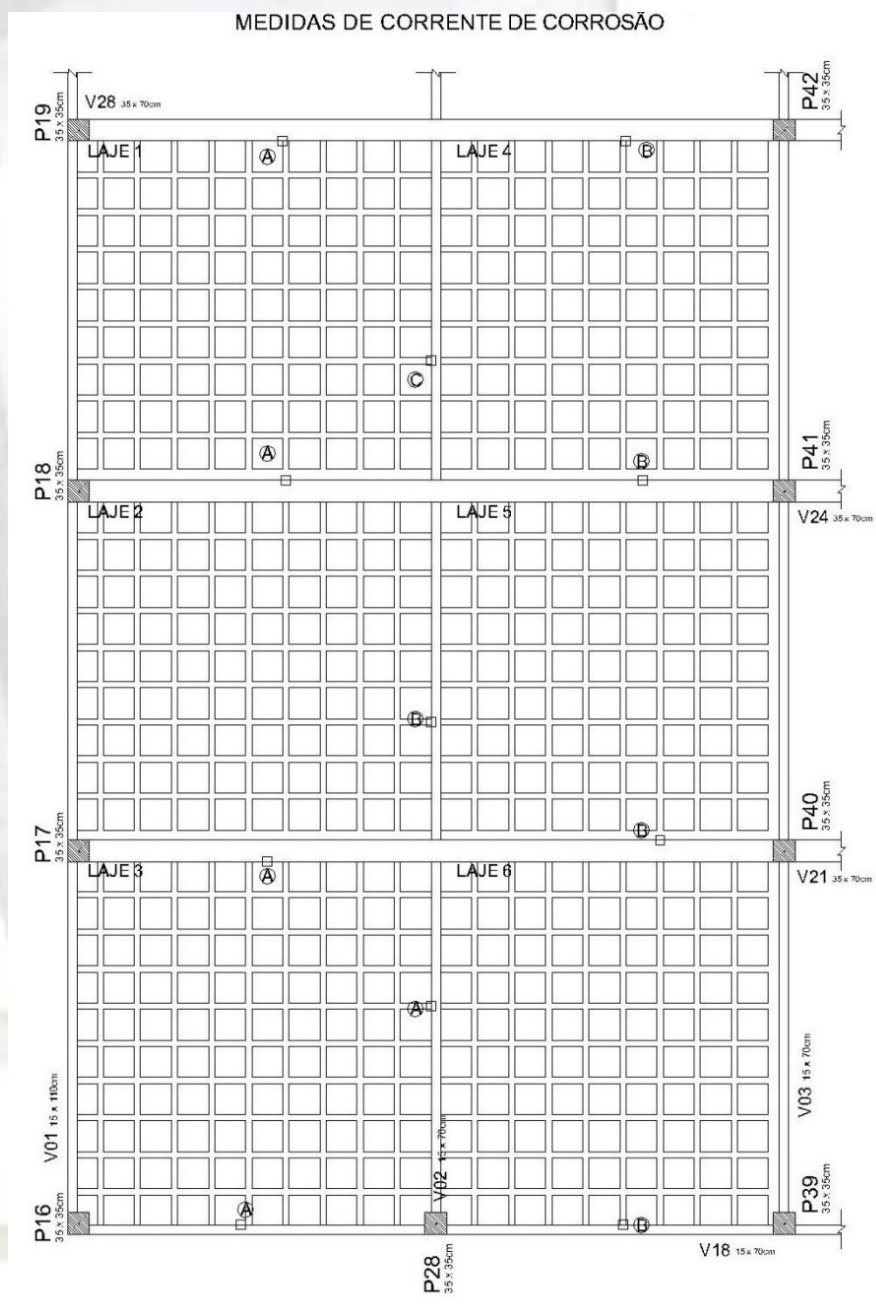


Figura 35 - Representação esquemática dos pontos onde foram realizadas as medidas de densidade de corrente de corrosão nas vigas do auditório.

Tabela 11 - Medidas de densidade de corrente de corrosão nas vigas do auditório.

VIGA 02					
Ponto de medida	Densidade de corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tipo de armadura	Tipo de armadura	Seção de armadura (cm^2)	Nível de corrosão
A (lado direito)	0,63	Flexão inferior	4 Ø 12.5	5,00	moderado
A (lado esquerdo)	0,47	Flexão inferior	4 Ø 12.5	5,00	baixo
A (estribo)	1,78	Transversal	Ø 5.0	0,20	elevado
B (lado direito)	0,29	Flexão inferior	4 Ø 10.0	3,20	baixo
B (lado esquerdo)	0,71	Flexão inferior	4 Ø 10.0	3,20	moderado

VIGA 18					
Ponto de medida	Densidade de corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tipo de armadura	Tipo de armadura	Seção de armadura (cm^2)	Nível de corrosão
A (lado direito)	5,28	Flexão inferior	4 Ø 8.0	2,00	elevado
A (lado esquerdo)	5,64	Flexão inferior	4 Ø 8.0	2,00	elevado
B (lado direito)	3,66	Flexão inferior	5 Ø 8.0	2,50	elevado
B (lado esquerdo)	3,08	Flexão inferior	5 Ø 8.0	2,50	elevado

VIGA 21					
Ponto de medida	Densidade de corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tipo de armadura	Tipo de armadura	Seção de armadura (cm^2)	Nível de corrosão
A (estribo)	0,79	Transversal	Ø 8.0	0,50	moderado
B (lado direito)	0,30	Flexão inferior	4 Ø 16.0 + 5 Ø 20.0	23,75	baixo
B (lado esquerdo)	0,07	Flexão inferior	4 Ø 16.0 + 5 Ø 20.0	23,75	insignificante

VIGA 24					
Ponto de medida	Densidade de corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tipo de armadura	Tipo de armadura	Seção de armadura (cm^2)	Nível de corrosão
A (estribo)	0,10	Transversal	$\varnothing 8.0$	0,50	insignificante
B (lado direito)	0,06	Flexão inferior	4 $\varnothing 16.0$ + 5 $\varnothing 20.0$	20,00	insignificante
B (lado esquerdo)	0,05	Flexão inferior	4 $\varnothing 16.0$ + 5 $\varnothing 20.0$	20,00	insignificante

VIGA 28					
Ponto de medida	Densidade de corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Tipo de armadura	Tipo de armadura	Seção de armadura (cm^2)	Nível de corrosão
A (estribo)	1,10	Transversal	$\varnothing 6.0$	0,28	elevado
B (lado direito)	0,12	Flexão inferior	4 $\varnothing 16.0$ + 3 $\varnothing 20.0$	17,45	insignificante
B (lado esquerdo)	0,11	Flexão inferior	4 $\varnothing 16.0$ + 3 $\varnothing 20.0$	17,45	insignificante

Os resultados indicam um cenário de corrosão elevada em todos os pontos de medição da V18 e um ponto na viga V02 e outro na viga V28. Esses últimos se referem a estribos e denotam a maior vulnerabilidade dessas armaduras quando os cobrimentos são baixos. Além desses, há três pontos de corrosão moderada identificados nas vigas V02 (dois) e viga V21 (um). O conjunto desse cenário mostra que, mesmo as vigas apresentando um grau de preservação bem melhor que as lajes, essas já começam a dar sinais de despassivação das armaduras e, portanto, merecem atenção.

Apesar das medidas de potencial não demonstrarem o cenário apresentado nas medidas de corrente de corrosão na mesma intensidade, verifica-se, na Tabela 10, vários pontos de medida mais eletronegativos que -200 mV (ESC), indicado uma tendência mudança de comportamento de algumas armaduras.

Especial atenção deve ser dada a viga V18, que apresentou todos os pontos com nível de corrosão elevado. Neste vaso específico, há que se considerar que se trata de uma viga em junta de dilatação, onde, muitas vezes, o cobrimento interno das armaduras não é cumprido em função do uso do EPS (usualmente empregado) ser um elemento frágil para garantir a separação das duas vigas paralelas. Isso pode ter levado a instalação da corrosão em faces internas da viga, captada pelas medidas de densidade de corrente de corrosão, mas não captada, na mesma amplitude, nas medidas de potencial de corrosão.

4.9 Perda de seção da armadura

A perda de seção das armaduras foi avaliada apenas em alguns pontos da estrutura, para não comprometer o comportamento estrutural da laje de cobertura. Os pontos analisados estão indicados na Figura 36 e os resultados de perda de diâmetro e de seção das armaduras são apresentados na Tabela 12.

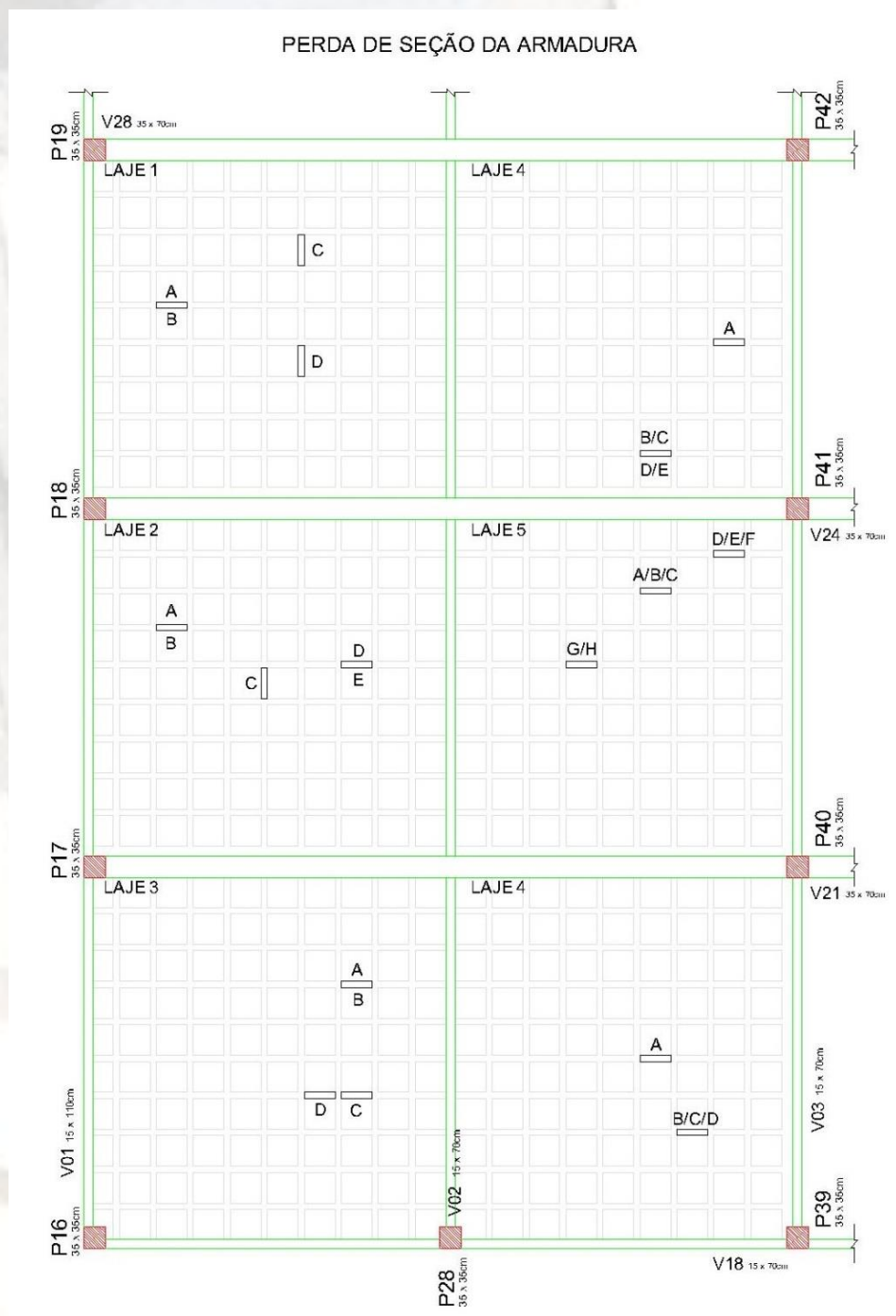


Figura 36 – Desenho esquemático dos pontos de medição da perda de seção da armadura.

Tabela 12 – Resultados de perda de diâmetro e de seção da armadura nas lajes.

LAJE 1				
Ponto de medida	Bitola original (mm)	Diâmetro medido (mm)	Perda de diâmetro (%)	Perda de seção (%)
A	4,2	4,15	-1,2	-2,4
B	8,0	7,55	-5,6	-10,9
C	4,2	4,10	-2,4	-4,7
D	4,2	4,10	-2,4	-4,7
Perda média de diâmetro / seção (%)			-2,9	-5,7

LAJE 2				
Ponto de medida	Bitola original (mm)	Diâmetro medido (mm)	Perda de diâmetro (%)	Perda de seção (%)
A	4,2	3,75	-10,7	-20,3
B	8,0	7,45	-6,9	-13,3
C	4,2	2,95	-29,8	-50,7
D	4,2	3,80	-9,5	-18,1
E	8,0	6,2	-22,5	-39,9
Perda média de diâmetro / seção (%)			-15,9	-28,5

LAJE 3				
Ponto de medida	Bitola original (mm)	Diâmetro medido (mm)	Perda de diâmetro (%)	Perda de seção (%)
A	4,2	4,00	-4,8	-9,3
B	8,0	7,95	-0,6	-1,2
C	4,2	3,45	-17,9	-32,5
D	8,0	7,75	-3,1	-6,2
Perda média de diâmetro / seção (%)			-6,6	-12,3

LAJE 4				
Ponto de medida	Bitola original (mm)	Diâmetro medido (mm)	Perda de diâmetro (%)	Perda de seção (%)
A	4,2	3,95	-6,0	-11,6

B	4,2	3,55	-15,5	-28,6
C	8,0	7,10	-11,3	-21,2
D	8,0	6,95	-13,1	-24,5
E	4,2	3,6	-15,5	-28,6
Perda média de diâmetro / seção (%)			-12,3	-22,9

LAJE 5				
Ponto de medida	Bitola original (mm)	Diâmetro medido (mm)	Perda de diâmetro (%)	Perda de seção (%)
A	4,2	2,95	-29,8	-50,7
B	8,0	6,85	-14,4	-26,7
C	8,0	7,02	-12,3	-23,0
D	8,0	7,25	-9,4	-17,9
E	4,2	2,8	-34,5	-57,1
F	8,0	7,15	-10,6	-20,1
G	8,0	5,6	-30,6	-51,9
H	4,2	1,4	-66,7	-88,9
Perda média de diâmetro / seção (%)			-26,0	-42,0

LAJE 6				
Ponto de medida	Bitola original (mm)	Diâmetro medido (mm)	Perda de diâmetro (%)	Perda de seção (%)
A	4,2	3,65	-13,1	-24,5
B	4,2	4,05	-3,6	-7,0
C	8,0	7,25	-9,4	-17,9
D	8,0	7,03	-12,1	-22,8
Perda média de diâmetro / seção (%)			-9,5	-18,0

Os resultados indicam perdas de seção significativas em várias armaduras de laje, com valores bem superiores a 10 % da seção original. Isso indica um processo de corrosão ativo já há alguns anos e com intensidade relativamente elevada, o que denota a necessidade de intervenção nas lajes inspecionadas. Nesse sentido, destacam-se as lajes 2, 4, 5 e 6 do auditório, com perdas médias de seção da armadura da ordem de 28,5 % para a laje 2, 23% para a laje 4, 42 % para a laje 5 e 18 % para a laje

6. Nesses casos, a recomposição da seção de armadura é essencial.

4.10 Condições gerais da estrutura

A partir dos resultados da inspeção visual e dos ensaios realizados *in loco* anteriormente apresentados, pode-se fazer a seguinte análise geral sobre a estrutura, considerando-se individualmente os elementos laje nervurada e vigas.

Sobre as lajes nervuradas

As lajes apresentam um avançado grau de deterioração das armaduras das nervuras, com vários pontos indicando elevado nível de corrosão. Isso pode ser verificado na inspeção visual realizada, onde pontos de desprendimento de placas de concreto e exposição de armaduras puderam ser visualizados (ver Figura 23), bem como nas medidas perda de seção realizadas, onde vários pontos indicaram perdas de seção superiores a 10 %, outra quantidade significativa com perda de seção acima de 20 % e alguns pontos com perda superior a 50 % (ver Tabela 12). Essa situação é claramente corroborada pelos resultados de potencial de corrosão. Está claro que o componente estrutural laje nervurada é o mais deteriorado, com redução do seu desempenho, quer seja pela redução de seção das armaduras, quer seja pelo impacto demandando pela fissuração e desprendimento da capa de cobrimento sobre a aderência da armadura no concreto.

Diante deste quadro, esse componente estrutural deve ser objeto de especial atenção, devendo passar por processo de recuperação com a urgência que um caso como esse requer.

Sobre as vigas

As vigas apresentam um grau de preservação superior ao das lajes nervuradas. As fissuras existentes são, em sua maioria, decorrentes do fenômeno de retração. Mesmo assim, os ensaios eletroquímicos indicam alguns pontos com probabilidade de corrosão incerta e medidas de densidade de corrente de corrosão com nível de corrosão elevado (ver Tabela 11). Isso indica que há armaduras que mesmo sem apresentar sinais externos de corrosão, já foram ativadas e devem também passar por um processo de recuperação.

Considerando o grau de preservação das vigas, a recuperação das partes que já se visualizam como ativas não tem a mesma urgência que se observa nas lajes nervuradas, mas nem por isso pode ser esquecido, sob pena de se agravar e por em risco o seu comportamento estrutural. Considere-se

em separado o caso da viga V18, que apresentou taxas de corrosão elevadas e, portanto, demanda apreciação mais urgente.

5 DIAGNÓSTICO E PROPOSTA DE RECUPERAÇÃO

5.1 Diagnóstico sobre os problemas de corrosão de armaduras

O diagnóstico sobre os problemas de corrosão encontrados pode ser abordado sobre três aspectos: o projeto, o micro-ambiente, o material e o uso e manutenção da estrutura.

Sobre o projeto

Sobre o projeto, o ponto principal a ser destacado é que a normalização vigente à época de elaboração do projeto apresentava requisitos de durabilidade insuficientes para fazer frente às condições de exposição às quais a estrutura viria a ser exposta. Isso é fato e pode ser comprovado com a seguinte revisão da normalização referente a estruturas de concreto, que incrementou, significativamente, as espessuras de cobrimento a serem adotadas em estruturas em condições de exposição semelhantes à aqui analisada.

Contudo, deve-se adicionar o fato de o projeto haver adotado cobrimentos nominais 5 mm inferiores aos recomendados pela então NBR 6118 (ABNT, 1980) nas vigas e 10 mm inferiores, no caso das lajes (vide Quadro 7). Essas características de projeto certamente contribuíram para a ativação das armaduras em um intervalo ainda menor de tempo ao que seria esperado no caso de terem sido adotados cobrimentos nominais de 20 mm, conforme recomendava a NBR 6118 (ABNT, 1980) à época.

Sobre o micro-ambiente

Sobre o micro-ambiente, é importante colocar que as medidas de concentração de CO₂ no ambiente do auditório se apresentaram, em ter médios, no patamar de 412 ppm com as janelas fechadas (o que ocorre na maior parte do tempo). Valor este mais de 50% superior àquele obtido com as janelas abertas (quando há renovação do ar). Esse aspecto também se configura como um aspecto contributivo para o avanço da frente de carbonatação a uma maior velocidade abreviando o período de iniciação da corrosão.

Soma-se a este aspecto o fato dos parâmetros climáticos, em especial a umidade relativa,

também se situar em uma faixa favorável ao avanço da frente carbonatação, conforme colocado no item 1.3.

Desta forma, os fatores micro-ambientais, em especial a disponibilidade de CO₂ e a umidade relativa, também se situaram em condições favoráveis ao avanço da frente de carbonatação e o consequente encurtamento do período de iniciação da corrosão.

Sobre o material

Sobre o material, há que se fazer uma separação entre os concretos advindos da indústria de pré-fabricados e o concreto moldado in loco, advindo das empresas de fornecimento de concreto usinado. No primeiro caso, esses concretos são representados pelos concretos presentes na base das nervuras treliçadas e aqueles presentes nas plaquetas que incorporaram o sistema Franca adotado no projeto.

O primeiro ponto a ser considerado é que, em ambos os tipos de concreto, a presença de cloretos se situou em níveis abaixo do máximo aceitável por norma, descartando-se a possibilidade de contaminação prévia do concreto por cloretos (um dos agentes desencadeantes da corrosão de armaduras).

Por outro lado, durante a inspeção realizada, observou-se que o concreto dos pré-fabricados tem características inferiores ao concreto moldado na obra. Aquele apresentou-se bem mais frágil no manuseio e com profundidades de carbonatação bem maiores que o concreto executado na obra. Isso caracteriza o concreto dos pré-fabricados com porosidade significativamente superior ao concreto usinado e se materializa nas velocidades de avanço da frente de carbonatação, onde o primeiro apresenta velocidade média de avanço da frente de carbonatação da ordem de 5,6 mm/ano^{0,5}, enquanto que o segundo apresentou velocidade média da ordem de 2,3 mm/ano^{0,5}.

Ainda sobre o material, há que se acrescentar o fato de que, em vários pontos, identificou-se o descolamento de algumas plaquetas em relação ao concreto moldado na obra, o que pode ter ocorrido em função já de um processo de corrosão instalado ou por uma falha de aderência entre os dois materiais. Neste último caso, essa separação entre os materiais também se coloca de forma contributiva para a aceleração do processo de carbonatação pela abertura instalada.

Sobre o uso e manutenção da estrutura

Sobre este aspecto, o principal ponto a ser destacado recai sobre os diversos locais de infiltração observados na laje do auditório. Essas infiltrações aceleram o processo de corrosão instalado

e, de fato, foi o que se observou nas medidas perda de seção corroboradas por medidas de potencial de corrosão mais eletronegativas (vide Figura 33).

Adicione-se a este aspecto o fato da demora em realizar intervenções de recuperação na estrutura analisada, o que seguramente contribuiu para o agravamento da situação encontrada.

Diagnóstico final

Sobre a causa primária da instalação da corrosão de armaduras na estrutura inspecionada tem-se o fenômeno de carbonatação do concreto. As características do concreto presente nos elementos pré-fabricados associado ao baixo cobrimento das armaduras foram os elementos preponderantes para o encurtamento do período de iniciação da corrosão, gerando um quadro de degradação avançada das nervuras das lajes.

Aspectos como a maior concentração de CO_2 no ambiente do auditório e a presença de umidades relativas em zona favorável à carbonatação auxiliaram neste processo, mas não se configuram como preponderantes. As infiltrações atuaram no agravamento do quadro de corrosão já instalado.

5.2 Prognóstico em relação ao problema de corrosão de armaduras

O prognóstico em relação aos problemas identificados pode ser colocado em duas etapas: primeiro em relação às lajes nervuradas e segundo em relação às vigas de concreto armado.

Em relação às lajes nervuradas, não cabe mais fazer prognóstico em relação ao avanço da frente de carbonatação, pois essa já atingiu (e até ultrapassou) o nível das armaduras. No entanto, há que se colocar que as perdas de seção de armadura identificadas nas regiões analisadas ensejam a demanda de intervenção imediata, principalmente nas lajes 2 e 5 e, não menos urgentes as lajes 4 e 6. Isso não descarta a necessidade de intervenção também nas lajes 1 e 3, mesmo que apresentem um quadro de degradação menos acentuado.

É importante acrescentar que o TRE deve estudar a possibilidade de alívio de cargas nas referidas lajes e/ou a colocação de escoramento provisório, com o objetivo de evitar riscos de acidentes estruturais decorrentes do nível de perda de seção das armaduras em regiões específicas das lajes do auditório.

Em relação às vigas de concreto armado, embora tenha-se observado a ativação das armaduras em alguns pontos, esses elementos estruturais apresentam um grau de preservação bem melhor que

as lajes. Contudo, considerando o baixo cobrimento das armaduras, não há um período longo remanescente para ativação das armaduras de forma generalizada, conforme expõe a Figura 37. Nessa figura, observa-se que, numa condição mais favorável à carbonatação, em cerca de 7 anos, a frente de carbonatação atingiria a armadura mais externa de todas as vigas e, num cenário intermediário, isso aconteceria em cerca de 22 anos e meio.

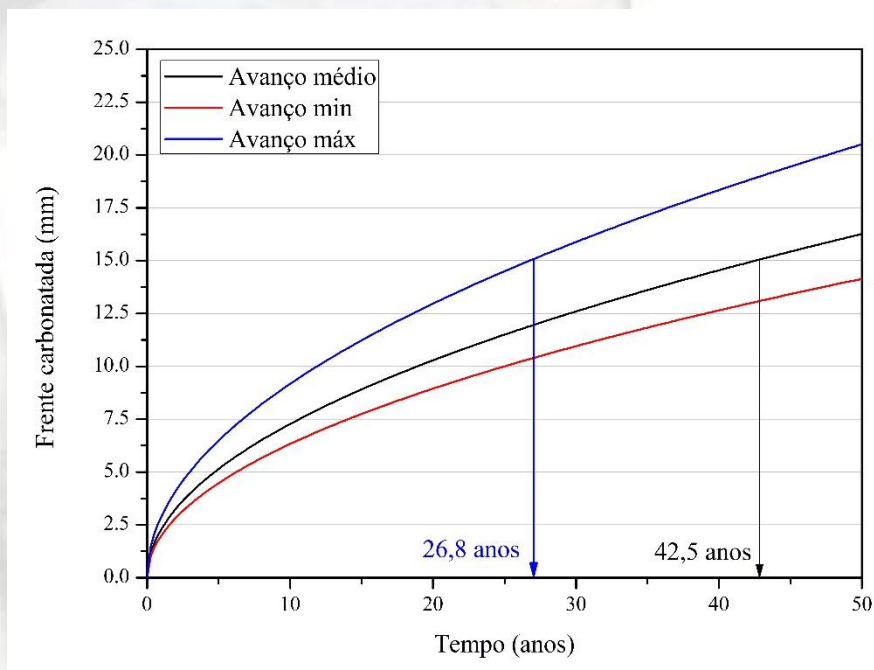


Figura 37 – Projeção do avanço da frente de carbonatação nas vigas do auditório e escada.

Contudo, há dois aspectos a serem considerados. Primeiro, o indicador de fenolftaleína, internacionalmente empregado, mostra o ponto de viragem do pH em torno de 8,3, o que é uma convenção para indicar a profundidade carbonatada. No entanto, além dessa profundidade, ainda há zonas de carbonatação intermediária, que são suficientes para ativar as armaduras. Segundo, o cobrimento nominal definido em projeto permite uma variabilidade e, nesse sentido, uma variação de alguns milímetros no cobrimento da armadura, 2,5 mm por exemplo, para menos, significa uma condição praticamente suficiente para a despassivação da armadura. Assim, verifica-se que as armaduras mais externas das vigas se situam em uma condição bem próxima da despassivação, o que se comprova com algumas medidas de potencial de corrosão corroboradas por medidas de densidade de corrente de corrosão.

Neste cenário, há que se destacar o caso específico da viga V18, que apresentou medidas de

densidade de corrente de corrosão elevadas. Essa é uma viga situada em uma junta de dilatação, onde muitas vezes o cobrimento interno das armaduras não é cumprido em função do uso do EPS (usualmente empregado) ser um elemento frágil para garantir a separação das duas vigas paralelas. Essa viga, em específico, necessita de inspeção na parte mais interna para comprovar essa condição e, em se confirmando, deve passar por procedimento de recuperação de forma mais urgente.

As demais vigas demandam, eventualmente, alguma recuperação de forma localizada nos pontos em que as medidas eletroquímicas indiquem mas também, procedimentos preventivos de proteção, como se comenta no item seguinte.

5.3 Proposta de recuperação

A proposta de recuperação será apresentada em duas etapas: primeiro em relação às lajes nervuradas e segundo em relação às vigas de concreto armado.

Em relação às lajes nervuradas, o procedimento sugerido é o que se segue, sempre considerando a intervenção por setores e com o prévio escoramento das lajes.

1. Remoção de todo o concreto carbonatado em profundidade suficiente para ultrapassar a armadura;
2. Limpeza da armadura danificada;
3. Reposição da seção de armadura, quando for o caso, garantindo as emendas e ancoragens estabelecidos pela normalização vigente;
4. Aplicação de pintura de proteção para armadura;
5. Recomposição da seção de concreto com graute de base cimentícia, respeitando as características de aplicação recomendadas pelo fabricante e ampliando o cobrimento das armaduras para as condições recomendadas na NBR 6118 (ABNT, 2013), considerando a classe II de exposição;
6. Aplicação de uma pintura de proteção, do tipo cristalizante, para proporcionar um refinamento da porosidade superficial. Essa etapa poderá ser substituída pela incorporação desse tipo de produto ao graute aplicado na etapa anterior, desde que haja compatibilidade entre os produtos.

Em relação às vigas, há que se considerar duas situações. A primeira se refere ao caso em que há corrosão ativa nas armaduras e a segunda se refere ao caso em que ainda não há corrosão ativa.

No primeiro caso, o procedimento sugerido é semelhante ao indicado para o caso das lajes, conforme de descreve a seguir:

1. Remoção de todo o concreto carbonatado em profundidade suficiente para ultrapassar a armadura;
2. Limpeza da armadura danificada;
3. Reposição da seção de armadura, quando for o caso, garantindo as emendas e ancoragens estabelecidos pela normalização vigente;
4. Aplicação de pintura de proteção para armadura;
5. Recomposição da seção de concreto com graute de base cimentícia, respeitando as características de aplicação recomendadas pelo fabricante;
6. Aplicação de uma pintura de proteção, do tipo cristalizante, para proporcionar um refinamento da porosidade superficial. Essa etapa poderá ser substituída pela incorporação desse tipo de produto ao graute aplicado na etapa anterior, desde que haja compatibilidade entre os produtos.

No segundo caso, o procedimento sugerido é o seguinte:

1. Aplicação de solução realcalinizadora para concretos carbonatados, com penetração por absorção difusão, seguindo recomendação do fabricante;
2. Monitorar a realcalinização da capa de cobrimento até que se comprove a realcalinização da capa de cobrimento por inteiro;
3. Monitoramento da armadura, para comprovar as condições de passividade da mesma;
4. Só então proceder a aplicação de cristalizante de superfície, com o objetivo de refinar a porosidade superficial do concreto e mitigar a carbonatação posterior do concreto.

Todos esses procedimentos serão melhor detalhados no projeto executivo que ainda será apresentado e integra o objeto contratado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 222. **Protection of metals in concrete against corrosion**. ACI: Farmington Hills, 2002
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM G-140. **Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM G-1. **Standard practice for preparing, cleaning and evaluation of corrosion test specimens**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. ASTM C-876. **Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 2017.
- ARAÚJO, C. C. **Estudo de correlações entre propriedades do concreto e ensaios não destrutivos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto e execução de obras de concreto armado – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concreto – preparo, controle e recebimento – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**. Concreto de cimento Portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7484**. Concreto endurecido – avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**. Concreto endurecido – determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica - método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ANDRADE, C. **Manual de inspección de obras danadas por corrosión de armaduras**. Madrid: CSIC/IETTcc, 1988. p. 122.
- ANGST, U. M.; ELSENER, B.; LARSEN, C. K.; VENNESLAND, Ø. Critical chloride content in reinforced concrete — A review. **Cement and Concrete Research**. v. 39 (12), p. 1122-1138, 2009.
- BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; POLDER, R. B. **Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair**. 2ª Edição, Weinheim: Ed. Wiley-VCD, 2004. p. 21-23, 49, 64, 71-104.
- CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armaduras em concreto - Inspeção e Técnicas Eletroquímicas**. Co-edição, São Paulo: Ed. PINI, 1997. p. 39-76.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ações da carbonatação no concreto**. In: Concreto – ciência e tecnologia. São Paulo: IBRACON, p. 849-885, 2011.
- CIGNA, R.; ANDRADE, C.; NÜRNBERGER, U.; POLDER, R.; WEYDERT, E.; SEITZ, E. **Corrosion of steel in reinforced concrete structures**. COST Action 521 – Final Report. European Community: Luxembourg, 2003.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. **EHE 08**. Instrucción de Hormigón Estructural. Madrid, 2008.

FRANKOWSKI, P. K. Corrosion Detection and Measurement Using Eddy Current Method. In: 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, **Proceedings...**, Swinoujście: 18th IIPhDW; 2018. p. 398-400.

MEIRA, G. R. **Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado**. 2004. 269 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MEIRA, G.R., ANDRADE, M.C., ALONSO, M.C., PADARATZ, I.J., BORBA Jr., J.C.. Measurements and modelling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 5596–5607, 2006.

MEIRA, G.R., ANDRADE, C., ALONSO, C., PADARATZ, I.J., BORBA Jr., J.C. Salinity of marine aerosols in a Brazilian coastal area—Influence of wind regime. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 8431–8441, 2007.

MEIRA, G. R. *et al.* Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 427-435, 2007.

MEIRA, G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, diagnóstico e prevenção**. João Pessoa; Ed. IFPB, 2017. p. 25-26, 31-42, 49-74.

NORDTEST. **NT BUILD 492**. Concrete, mortar and cement based repair materials – chloride migration coefficient from non-steady state migration experiments. NORDTEST: Finland, 1999.

RILEM CP 18. Measurement of hardened concrete carbonation depth. **Materials and Structures**, v. 21, p. 453-455, 1988.

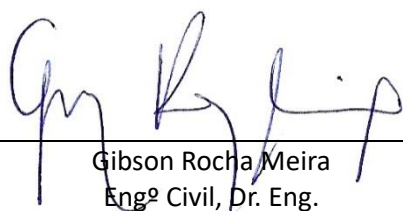
RILEM TC 178 -TMC. Analysis of total chloride content in concrete. **Materials and Structures**, v. 35, p. 583-585, 2002a.

VIEIRA, R. M.; MARQUES, V. C.; PADILHA JR., M.; MEIRA, G. R. Estudo da carbonatação natural de concretos em ambiente urbano. **Concreto e Construções**, v.58, p. 24-29, 2010.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Sweden: CBI, 1982. p. 468.

WENNER, F. **A method of measuring resistivity**. National Bureau of Standards, Scientific Bulletin, 12, 478-496, 1915

João Pessoa, 16 de dezembro de 2019.



Gibson Rocha Meira
Engº Civil, Dr. Eng.



Pablo Ramon R. Ferreira
Engenheiro Civil
CREA PB 160926894-6

Pablo Ramon Rodrigues Ferreira
Engº Civil, MSc.