

METODOLOGIA PARA CORRELAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADA NO DIAGNÓSTICO DE UM EMPREENDIMENTO DA DÉCADA DE 60

**Emerson Meireles de Carvalho
Luana de Jesus Souza
Lana Laís Pereira da Cruz**



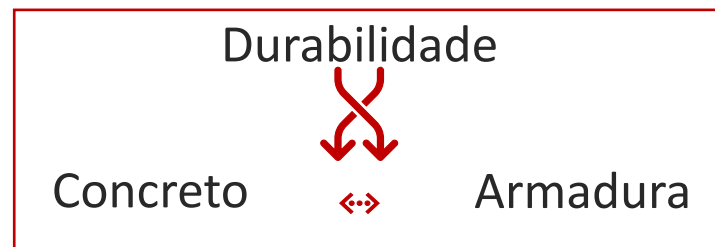
11 A 15
SETEMBRO | 2023
SÃO PAULO - SP

REALIZAÇÃO



IBAPE NACIONAL
Instituto Brasileiro de Avaliações
e Perícias de Engenharia

INTRODUÇÃO



Estratégias eficientes para o monitoramento e avaliação de estruturas de concreto armado.

Ensaaios Não Destrutivos (ENDs)

- Termografia;
- Detecção eletromagnética da armadura ou pacometria;
- Esclerometria;
- Ultrassom ou velocidade de pulso ultrassônico (VPU);
- Profundidade da frente de carbonatação;
- Profundidade da frente penetração de cloretos;
- Resistividade elétrica superficial do concreto; e
- Potencial de corrosão da armadura.

Objetivo: desenvolvimento de uma metodologia aplicada ao diagnóstico de um empreendimento construído na década de 60, por meio do uso de ensaios não destrutivos e análise da correlação entre os resultados obtidos e as técnicas empregadas

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A tática de utilizar os ENDS nos processos investigativos é viável por não comprometer o desempenho das peças estruturais ensaiadas e/ou por causar fraturas facilmente reparáveis (MACHADO; SHEHATA; SHEHATA, 2009).

Detecção eletromagnética da armadura

Esclerometria

Ultrassom

Profundidade da frente de carbonatação

Profundidade da frente de penetração de cloretos

Resistividade elétrica superficial do concreto

Potencial de corrosão da armadura

DETECÇÃO ELETROMAGNÉTICA DA ARMADURA

- > O princípio desse ensaio é a detecção de um campo magnético que permite a identificação do posicionamento, dimensões e cobrimento da armadura (BARBOSA; NOBREGA, 2017; SOUZA, MEDEIRO; 2017).

Objetivo principal: *Verificar posição, bitola e cobrimento da armadura e fornecer dados preliminares para os outros ensaios*

ESCLEROMETRIA

- > A metodologia de ensaio para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido por meio do esclerômetro é estabelecida pela ABNT NBR 7584:2012. Conforme a ABNT, esse método deve ser utilizado como um complemento a outras formas de avaliação.

Objetivo principal: *Verificar homogeneidade do concreto*

ESCLEROMETRIA

Fatores que influenciam nesse ensaio: a presença de agregados pesados ou de grandes variações do diâmetro do agregado pode acentuar a variação no índice esclerométrico e a influência da carbonatação promove a superestimação na dureza da superfície do concreto.

ULTRASSOM

> O princípio desse ensaio compreende na relação entre o comprimento percorrido entre transdutores (emissor e receptor) e o tempo de propagação da onda, resultando em uma velocidade média (ABNT NBR 8802:2019).

Classificação da qualidade do concreto em função da Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

VPU (m/s)	>4500	3500 a 4500	3000 a 3500	2000 a 3000	<2000
Classificação	Excelente	Bom	Regular	Ruim	Péssimo

Fonte: Adaptado de Whitehurst (1951).

Objetivo principal: Verificar *homogeneidade do concreto*, detectar falhas e vazios no concreto e profundidade de fissuras.

PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO

- Método colorimétrico de aspersão de solução de fenolftaleína (indicador de pH). Esse ensaio consiste na aplicação da solução indicadora de pH sobre a superfície do concreto a ser analisada. Quando a superfície possui um pH adequado, a solução apresenta coloração rosada, entretanto, caso haja perda de alcalinidade, a substância não muda de cor, permanecendo incolor, permitindo a medição da frente de carbonatação na estrutura investigada.

Objetivo principal: Verificar redução da alcalinidade do concreto ou probabilidade de despassivação (*áreas carbonatadas*)

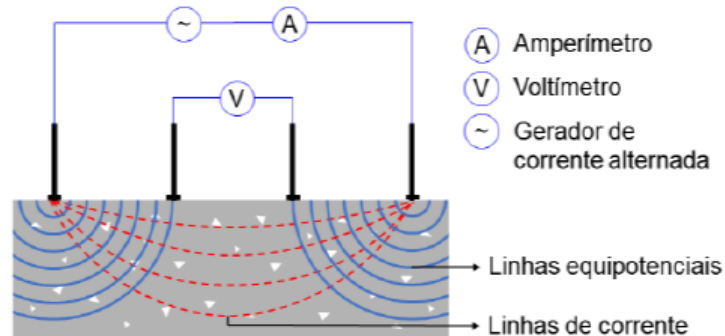
PROFUNDIDADE DA FRENTE DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS

- Esse ensaio consiste na aspersão de uma solução de nitrato de prata em uma pequena área fraturada do concreto; e através de uma reação fotoquímica ocorre a formação de dois produtos, sendo eles a formação de um precipitado branco (cloreto de prata), onde houver a presença de cloretos livres e a formação de precipitado marrom (óxido de prata), onde não há cloretos ou em regiões com cloretos combinados (BAROGHEL-BOUNY et al., 2007; MEDEIROS et al., 2009; MEDEIROS et al., 2018).

Objetivo principal: Verificar a *zona contaminadas por íons cloreto*

RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO

Esquema da determinação de resistividade superficial do concreto, pelo método dos quatro eletrodos



Fonte: Millard (1991) adaptado por Wosniack et al. (2021).

Risco de corrosão nas armaduras

Resistividade (ohm.cm)	Risco de corrosão da armadura
< 5000	Muito Alto
5000 a 10000	Alto
10000 a 20000	Moderado
> 20000	Baixo

Fonte: adaptada de CEB (1989).

Objetivo principal: Estimar a **probabilidade** (*risco*) da ocorrência e a velocidade dos **processos corrosivos** nas armaduras

POTENCIAL DE CORROSÃO DA ARMADURA

Probabilidade de corrosão

E_{corr} (mV, Cu/SO ₄ Cu)	Probabilidade de corrosão
> -200	< 5%
entre -200 e -350	50%
< -350	> 95%

Fonte: Adaptado da ASTM C876 (2015).

Objetivo principal: Verificar a **probabilidade** de que atividades **de corrosão** já estejam acontecendo

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO



11^A15
SETEMBRO | 2023
SÃO PAULO - SP

Resumo dos ensaios desenvolvidos

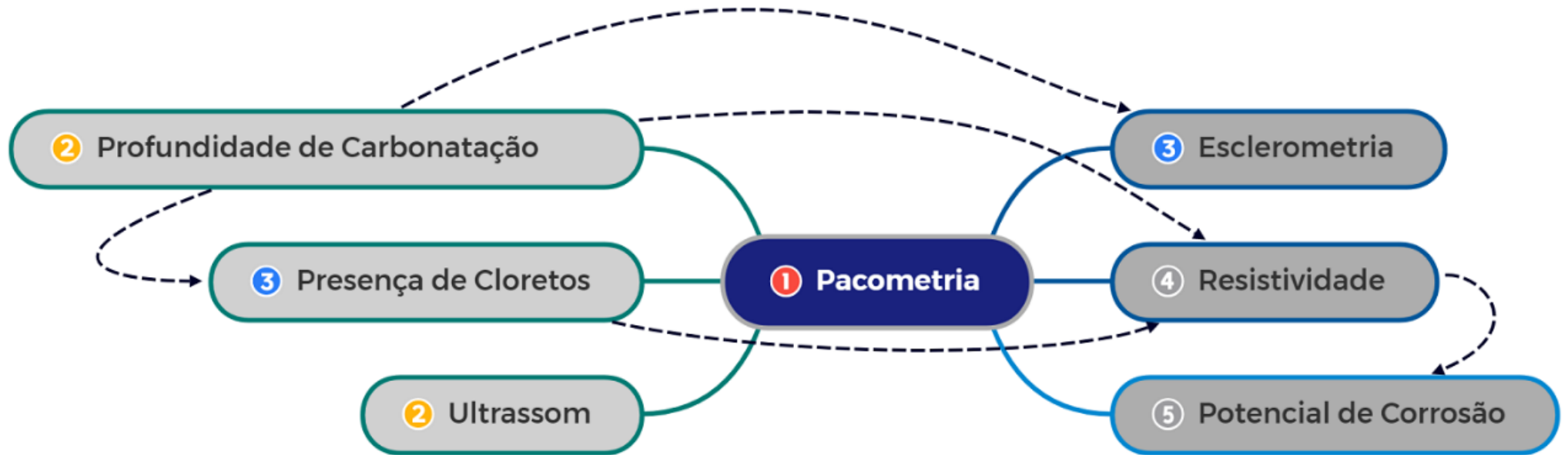
Nº	Ensaios não destrutivos (ENDs)	Equipamento/Técnica	Quantidade
1	Pacometria	Scanner de Parede D-Tect 200 C Profissional, da fabricante Bosch	352
2	Esclerometria	Esclerômetro digital, modelo TEM-912, da fabricante MetroTokyo	51
3	Ultrassom	Instrumento ultrassônico, Modelo Pundit Lab, da fabricante Proceq AS	51
4	Frente de penetração de carbonatação	Solução de fenolftaleína e borrifador	53
5	Frente de penetração de cloretos	Solução de nitrato de prata e borrifador	51
6	Resistividade elétrica do concreto	Terrômetro Digital Earth Test, modelo MTD 20KWe, da fabricante Magabras, régua de acrílico e eletrodos espaçados em 5 cm	51
7	Potencial de corrosão das armaduras	Multímetro no modelo Md-180L, da fabricante BWX e um eletrodo de cobre-sulfato de cobre, da fabricante Tanacas	50
TOTAL DE ENSAIOS			659

Fonte: Elaborada pelos autores.

REALIZAÇÃO



Esquema ilustrativo da sequência e correlação entre os ensaios



Fonte: Elaborado pelos autores.

11^A15
SETEMBRO | 2023
SÃO PAULO - SP

REALIZAÇÃO

Peça preparada para execução dos
ENDs



Pacometria



Esclerometria



Ultrassom



Fonte: Elaborada pelos autores.

Carbonatação



Profundidade de penetração de íons cloretos



Resistividade elétrica superficial



Potencial de corrosão



Fonte: Elaborada pelos autores.

CORRELAÇÕES E RESULTADOS

- Estrategicamente, optou-se por explorar os **resultados mais relevantes** para cada peça ensaiada, tendo como princípio norteador a **promoção da segurança**.

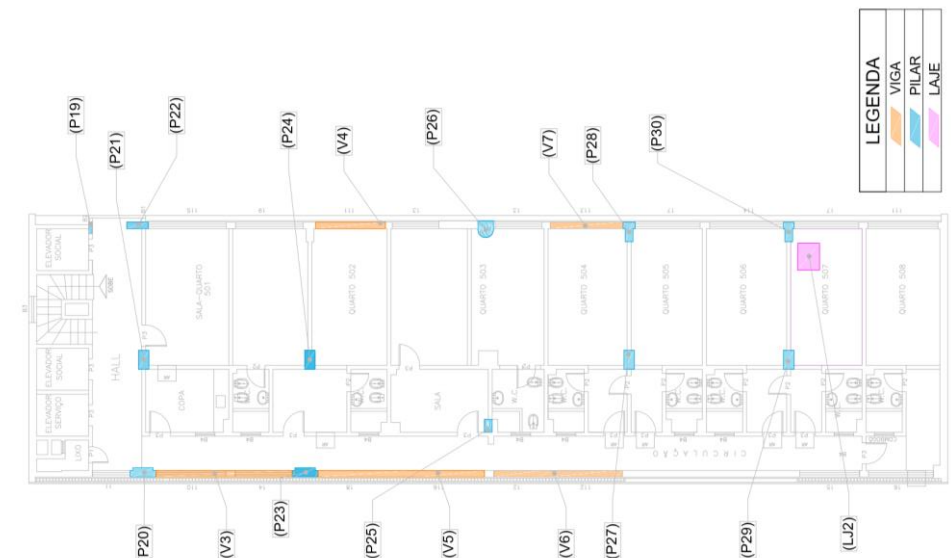
- Cobrimento da armadura;
- Esclerometria;
- Resistividade superficial elétrica; e
- Potencial de corrosão

↓ **valor encontrado**

- Carbonatação; e
- Presença de cloretos.

↑ **profundidade encontrada**

- A relação entre as VPUs obtidas pela transmissão indireta/direta foi estabelecida como igual a 0,57 para o caso em tela.
- 53 peças estruturais ensaiadas e para garantir rastreabilidade dos ensaios foram produzidos croquis de identificação:



Fonte: Elaborada pelos autores.

Recorte do resultado final e análise geral do desempenho dos elementos

PAV	ID	Elemento	Detecção eletromagnética da armadura	Carbonatação	Cloreto	Ultrassom		Esclerometria	Resistividade		Potencial de corrosão
			Cobrimento (cm)	Medida de profundidade de carbonatação (mm)	Medida de profundidade de contaminação por cloretos (mm)	Método	Velocidade média do pulso ultrassônico (m/s)	Índice esclerométrico médio (MPa)	Valor médio de resistividade (Ω cm)	Valor mínimo de resistividade (Ω cm)	Maior potencial de corrosão encontrado (mV)
Térreo	F1	Fundação	1,8	0	10,0	Direto	4.582,00	41,30	13561	8796	NE
1º	P2	Pilar	2,5	5	0,0	Indireto	3.107,30	50,30	91211	31730	-154,8
1º	P4	Pilar	2,4	5	0,0	Indireto	2.353,00	47,00	81629	60947	-50
1º	P1	Pilar	1,8	1	3,0	Indireto	2.375,00	49,90	301174	85451	-289
1º	P3	Pilar	2,0	0	0,0	Indireto	2.398,00	49,60	74142	32358	-268
2º	P5	Pilar	2,0	4	0,0	Direto	4.004,30	56,00	112574	76027	-179,2
3º	P8	Pilar	1,7	2	0,0	Indireto	3.052,70	58,20	378143	230907	-211
3º	P6	Pilar	2,5	0	0,0	Indireto	1.957,00	57,30	137968	98018	-196
3º	P9	Pilar	1,7	3	0,0	Indireto	3.617,00	54,60	60528	27018	-127,7
3º	V1	Viga	1,2	5	0,0	Direto	4.260,70	41,60	133413	57491	-713
3º	V1	Viga	1,4	10	NE	Indireto	2.299,30	NE	NE	NE	NE
4º	P11	Pilar	1,7	3	0,0	Direto	4.190,00	45,50	125350	98646	-158,2
4º	P13	Pilar	1,5	3	0,0	Indireto	2.550,00	51,60	51889	33615	-318
4º	V2	Viga	1,4	1	0,0	Direto	4.042,00	49,50	155718	101159	-64,7
Legenda											
NE - Peça não ensaiada											
Detecção eletromagnética da armadura						Resistividade			Potencial de Corrosão (ASTM C876)		
N,N		Cobrimento < profundidade de carbonatação				Resistividade (ohm.cm)		Risco de corrosão da armadura	E _{corr} (mV, Cu/SO ₄ Cu)		Probabilidade de corrosão
Esclerometria						< 5000		Muito Alto			
NN,NN		O resultado pode ter sido influenciado pela carbonatação				5000 a 10000		Alto	> -200	< 5%	Baixa
Ultrassom (Critério de Whitehurst)						10000 a 20000		Moderado	entre -200 e -350	50%	Incerta
Excelente		Bom	Regular	Ruim	Péssimo	> 20000		Baixo	< -350	> 95%	Alta

> Análises e verificações

CP I { ↑ alcalinidade

Consumo de cimento: 350 kg/m³

Estrutura robusta

↓ Cloretos

↑ Resistência elétrica superficial

↑ Índices esclerométricos

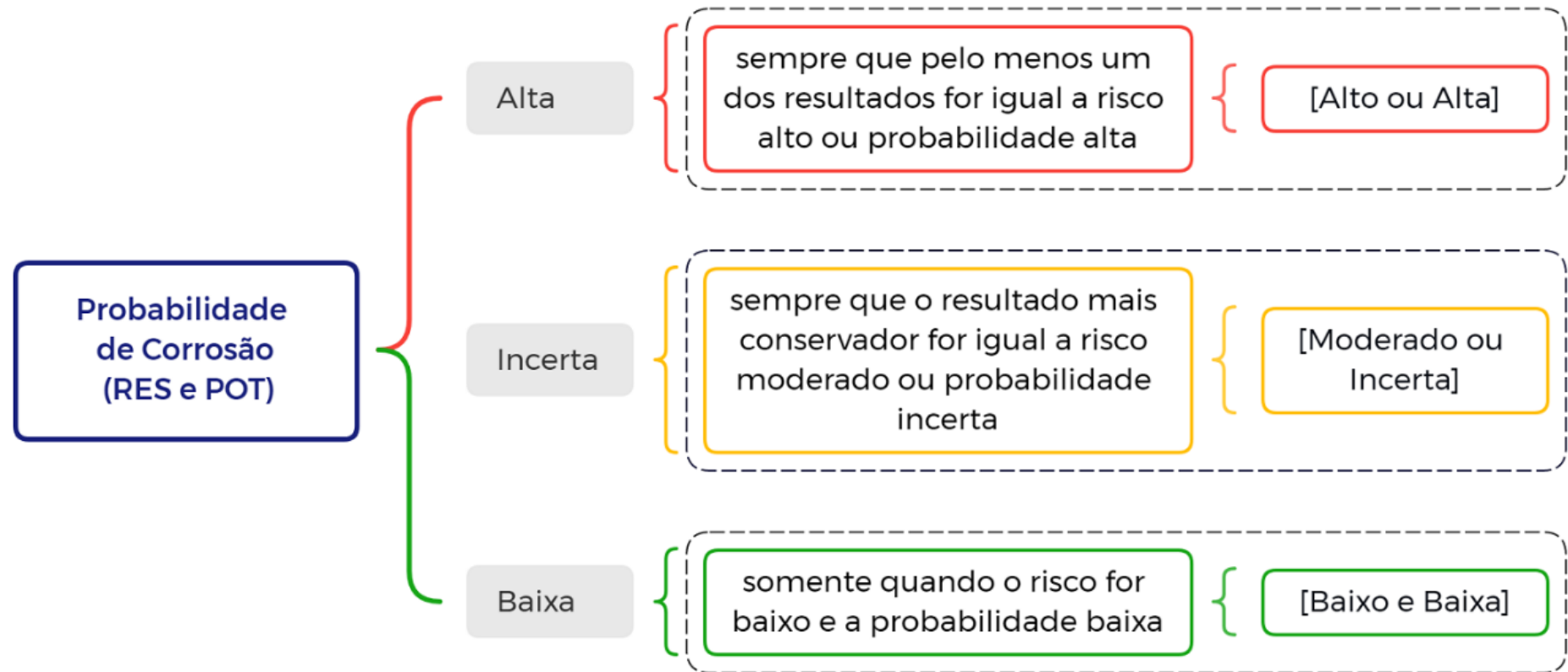
↑ VPU

PAV	ID	Deteção eletrônica da armadura	Carbonatação	Cloreto	Esclerometria	Ultrassom	Interpretação da Correlação
		Cobrimento (cm)	Medida de profundidade de carbonatação (mm)	Medida de profundidade de contaminação por cloretos (mm)	Índice esclerométrico médio (MPa)	Qualidade do concreto em função da VPU	
Térreo	F1	1,8	0	10,0	41,30	Excelente	Resultados divergentes, influência da umidade e cloretos
1º	P2	2,5	5	0,0	50,30	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
1º	P4	2,4	5	0,0	47,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
1º	P1	1,8	1	3,0	49,90	Bom	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente e presença de cloretos
1º	P3	2,0	0	0,0	49,60	Bom	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
2º	P5	2,0	4	0,0	56,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
3º	P8	1,7	2	0,0	58,20	Excelente	Resultados condizentes e satisfatórios
3º	P6	2,5	0	0,0	57,30	Regular	Resultados divergentes, conformação do pilar redondo pode ter influenciado
3º	P9	1,7	3	0,0	54,60	Excelente	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
3º	V1	1,2	10	0,0	41,60	Bom	Resultados condizentes, porém, peça com corrosão aparente
4º	P11	1,7	3	0,0	45,50	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
4º	P13	1,5	3	0,0	51,60	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
4º	V2	1,4	1	0,0	49,50	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
4º	LJ1	3,4	0	0,0	56,00	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios
5º	P24	1,3	1	0,0	42,90	Bom	Resultados condizentes e satisfatórios

Legenda			
	Apresentou íons de cloretos		Peça carbonatada
	Valor inferior ao mínimo (média - desvio padrão)		Valor superior ao máximo (média + desvio padrão)
Qualidade do concreto (VPU)	Excelente	Bom	Regular
			Ruim

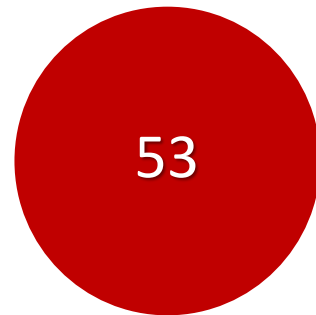
Fonte: Elaborada pelos autores.

> Análises e verificações

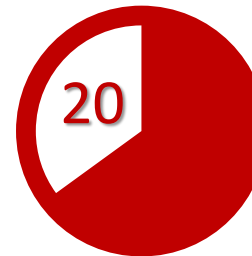


> Resultados

- ✓ 2 peças visualmente íntegras resultaram alta profundidade da frente de carbonatação, atingindo espessura maior que a profundidade da armadura, como também resultaram em probabilidade de atividades de corrosão alta.
- ✓ 11 peças apresentaram probabilidade alta de corrosão
- ✓ Resultados insatisfatórios
 - Pavimentos inferiores
 - Nas lajes
 - Elementos localizados nas extremidades (sujeitos à intempéries)
- ✓ Os pilares tiveram os resultados mais satisfatórios



peças ensaiadas



apresentaram resultados
desfavoráveis à segurança

CONCLUSÃO

- ✓ Considerando a importância da **segurança das estruturas de concreto armado** e o impacto negativo que a **corrosão das armaduras** pode ter na integridade desses elementos, o **objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia** para diagnosticar um empreendimento construído na década de 60. Para isso, **foram utilizados ensaios não destrutivos e análises para correlacionar** os resultados obtidos com as técnicas empregadas.
- ✓ Foram estabelecidas **duas correlações**:
 - > entre os ensaios que têm uma interferência direta na **avaliação da qualidade do concreto**, como esclerometria, ultrassom, carbonatação e presença de cloretos; e
 - > **verificação da atividade de corrosão da armadura**, correlacionando os ensaios de potencial de corrosão, resistividade elétrica, carbonatação, presença de cloretos e constatações visuais.

CONCLUSÃO

- ✓ Constatou-se que é necessário **contar com a expertise** de quem executa os ensaios, considerando a **estratégia de execução e o planejamento**, além da **investigação de fatores que possam interferir nos resultados**.
- ✓ É **indispensável** realizar uma **avaliação conjunta** dos resultados obtidos.
- ✓ Notou-se um **padrão entre os elementos** com desempenho insatisfatório e pôde-se sugerir um direcionamento para o processo de **tomada de decisão**.

