

14 a 17  
setembro  
2021

27ª SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

# TRILHOS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL

## Estudo dos coeficientes de carbonatação dos concretos de diferentes linhas do Metrô de São Paulo

Tatiana de Cassia Coutinho da Fonseca  
Marcelo Gabriel Capacla

REALIZAÇÃO



ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ



## AUTORES

**Tatiana de Cássia Coutinho Silva da Fonseca** é graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Bahia (2005), mestre em Engenharia de Estruturas pela USP (2007) e doutora (2013) pela mesma instituição. É especialista em patologia na construção civil (2021).

Atualmente é engenheira especializada na Companhia do Metropolitano de São Paulo na área de engenharia de estruturas.

*tcsfonseca@gmail.com*

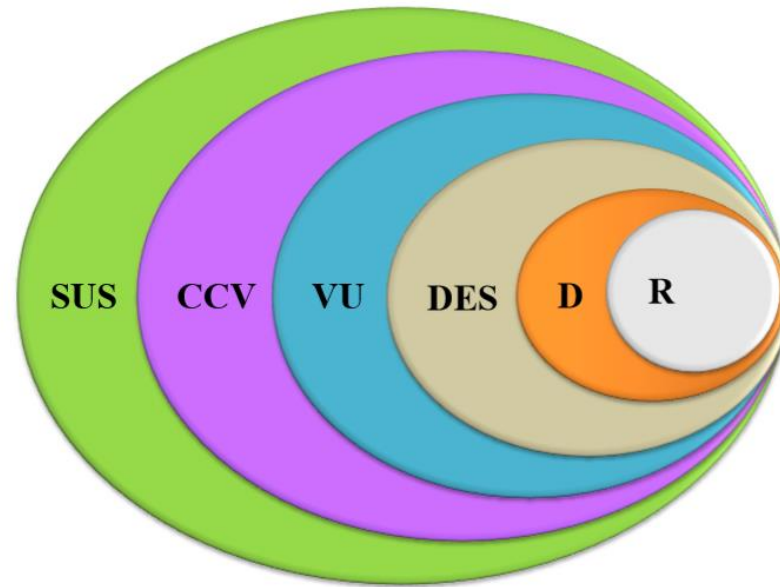
**Marcelo Gabriel Capacla** possui graduação de Tecnólogo – modalidade Edifícios pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (1997) e Engenharia Civil pela Universidade Anhembi Morumbi (2003). É especialista em patologia na construção civil (2021).

Atualmente é engenheiro na Companhia do Metropolitano de São Paulo na área de engenharia de estruturas.

*marcelocapacla@gmail.com*



# EVOLUÇÃO NO DIMENSIONAMENTO DO CONCRETO ARMADO



**Resistência (R)**  
**Durabilidade (D)**  
**Desempenho (DES)**  
**Vida Útil (VU)**  
**Custo do Ciclo de Vida (CCV)**  
**Sustentabilidade (SUS)**

País	Gastos com novas construções	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França	85,6 Bilhões de Euros (52%)	79,6 Bilhões de Euros (48%)	165,2 Bilhões de Euros (100%)
Alemanha	99,7 Bilhões de Euros (50%)	99,0 Bilhões de Euros (50%)	198,7 Bilhões de Euros (100%)
Itália	58,6 Bilhões de Euros (43%)	76,8 Bilhões de Euros (57%)	135,4 Bilhões de Euros (100%)
Reino Unido	60,7 Bilhões de Libras (50%)	61,2 Bilhões de Libras (50%)	121,9 Bilhões de Libras (100%)



**27ª SEMANA DE TECNOLOGIA  
 METROFERROVIÁRIA**

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
 ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

# DURABILIDADE DO CONCRETO ARMADO

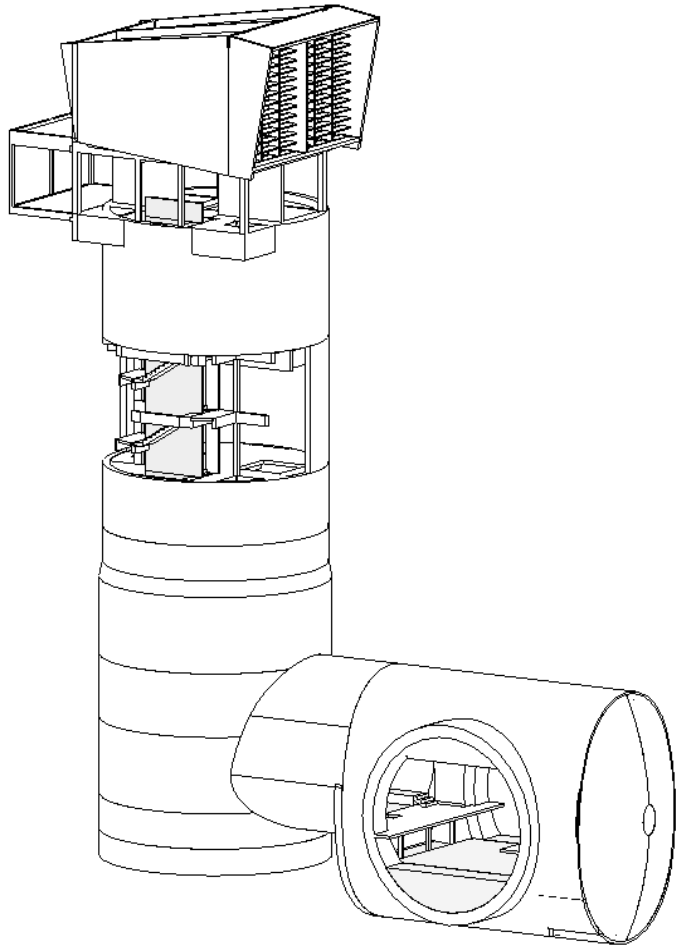
*“é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Portanto não é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto.” (MEDEIROS ET AL, 2011)*

## VIDA ÚTIL DE PROJETO

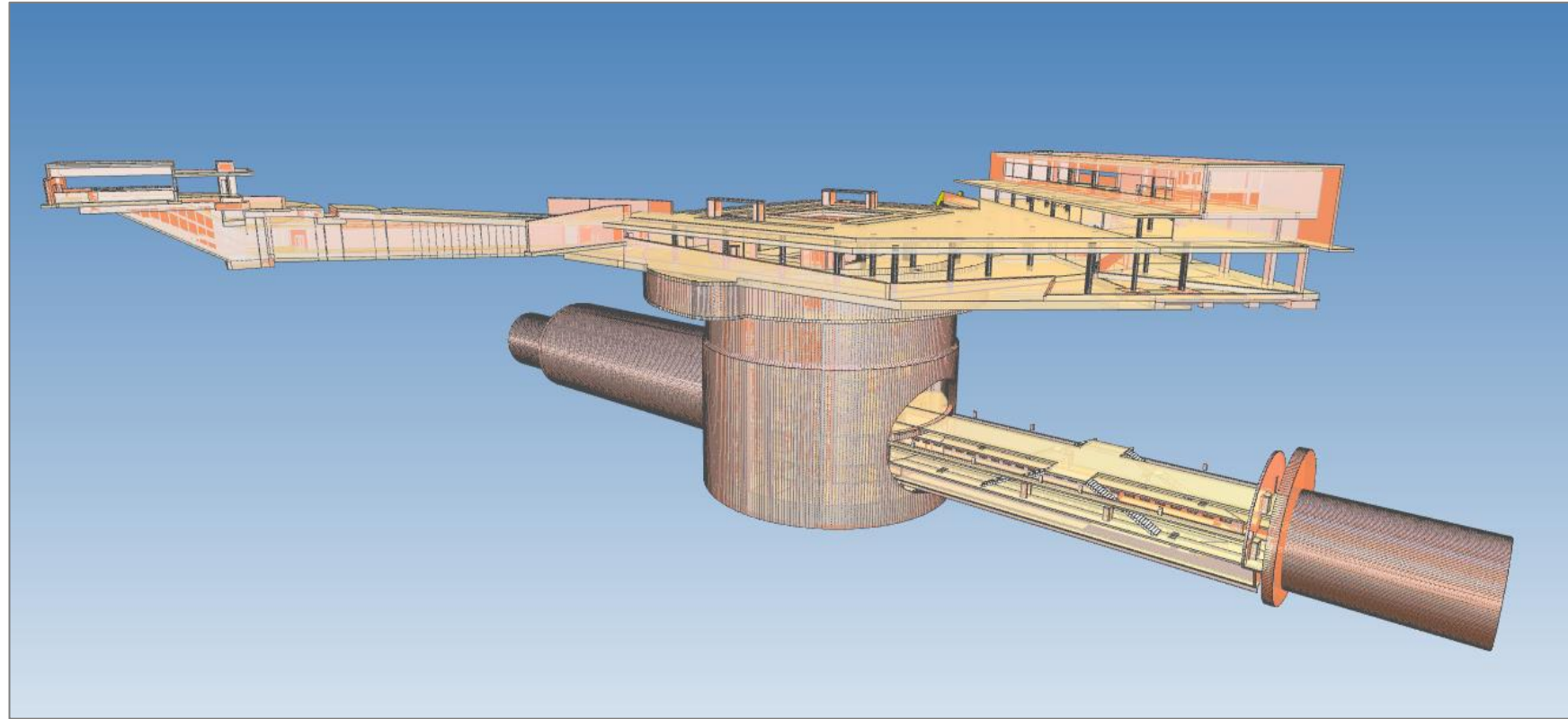
*“por vida útil de projeto, entende-se o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.” (ABNT NBR 6118, 2014)*



# ESTRUTURAS DO SISTEMA METROVIÁRIO



VENTILAÇÃO



ESTAÇÃO



27ª SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

# ESTRUTURAS DO SISTEMA METROVIÁRIO

- CONCRETO APARENTE
- PRINCIPAL AGENTE AGRESSIVO – CO<sub>2</sub>
- ESPECIFICAÇÕES ATUAIS:
  - VUP: 100 ANOS
  - RESISTÊNCIA DO CONCRETO, COBRIMENTO E RELAÇÃO A/C: USUALMENTE, MAIS CONSERVADORES QUE PRESCRITOS EM NORMA



**27<sup>a</sup>** SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

# MOTIVAÇÃO

**TÉCNICA:** INDICADOR PARA PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO

**ECONÔMICO SOCIAL:** EVITAR INTERVENÇÕES DE LONGA DURAÇÃO QUE IMPACTEM NAS ATIVIDADES COTIDIANAS DA POPULAÇÃO E POSSAM ACARRETAR EM PREJUÍZOS ECÔNOMICOS

**SUSTENTABILIDADE:** CONSTRUÇÃO DE OBRAS MAIS DURÁVEIS E A CONSERVAÇÃO DAS EXISTENTES, COMO FORMA DE RACIONALIZAR O USO DE RECURSOS E MATÉRIAS PRIMAS

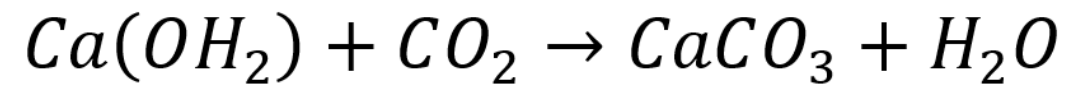
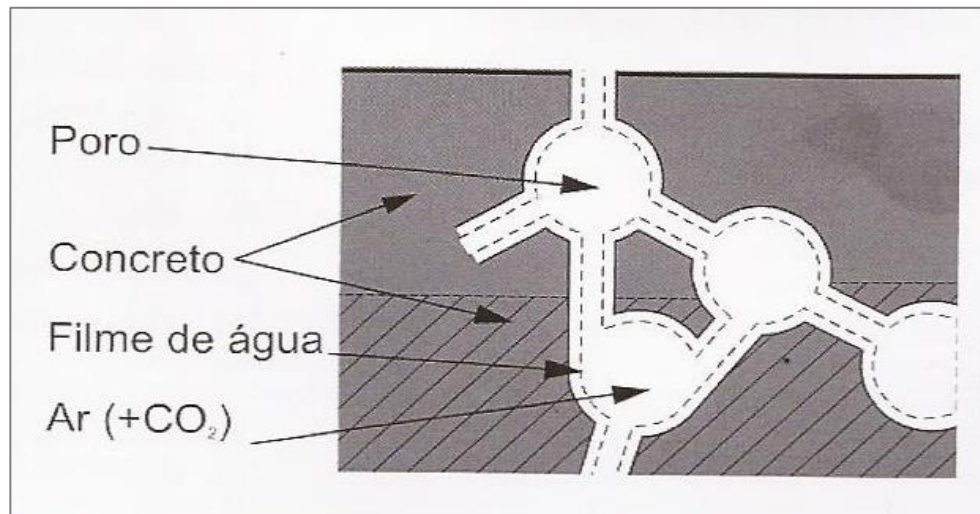


**27<sup>a</sup>** SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

# PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

Reação físico-química que reduz a alcalinidade do concreto.  
Favorece a oxidação das armaduras.





# ESTUDO DE CASO

Composto por ensaios em campo e ensaio laboratorial

Ensaio de Campo: realizados em estruturas de concreto de três linhas diferentes:

- LINHA 1 – AZUL
- LINHA 2 – VERDE
- LINHA 3 – VERMELHA

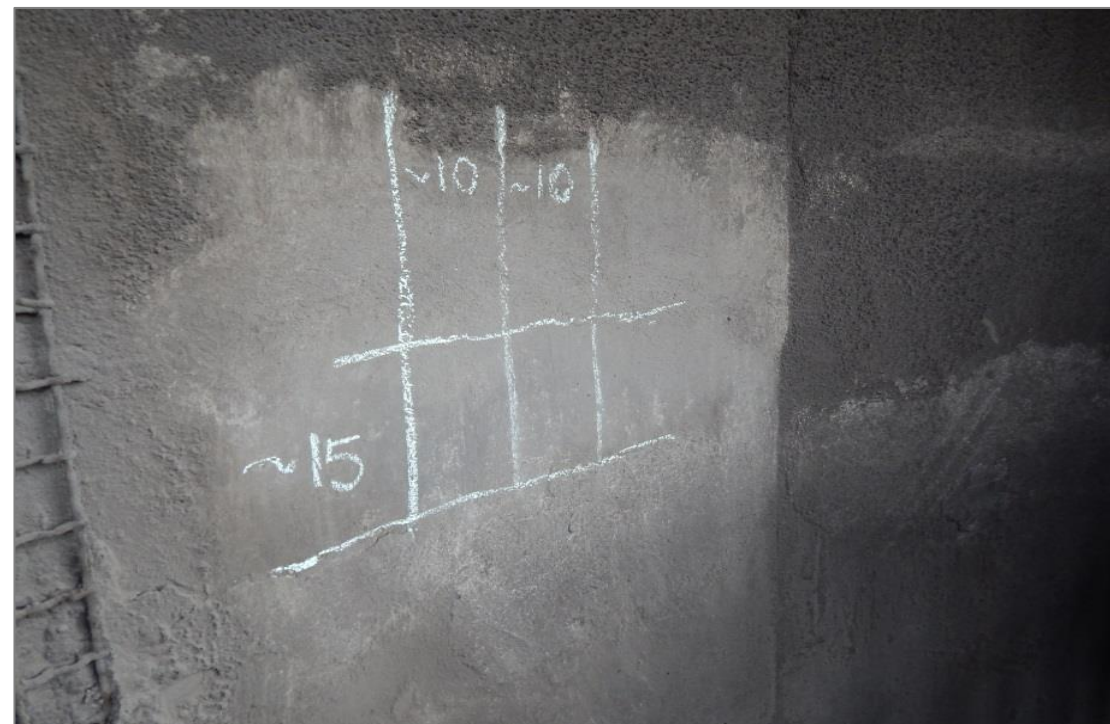
Ensaio Laboratorial: carbonatação acelerada em corpos de prova das obras de expansão



# PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS DE CAMPO



LIMPEZA DO LOCAL e  
DETECÇÃO DAS ARMADURAS



MARCAÇÃO DO POSICIONAMENTO DAS  
ARMADURAS



# PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS DE CAMPO



REMOÇÃO DO CONCRETO (MANUAL OU MECANICAMENTE) ATÉ A PROFUNDIDADE DA ARMADURA



LIMPEZA DO CORTE COM PINCEL



**27<sup>a</sup>** SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

# PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS DE CAMPO



APLICAÇÃO IMEDIATA DE SOLUÇÃO DE FENOLFTALEÍNA



MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO COM PAQUÍMETRO E RÉGUA METÁLICA



**27<sup>a</sup>** SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

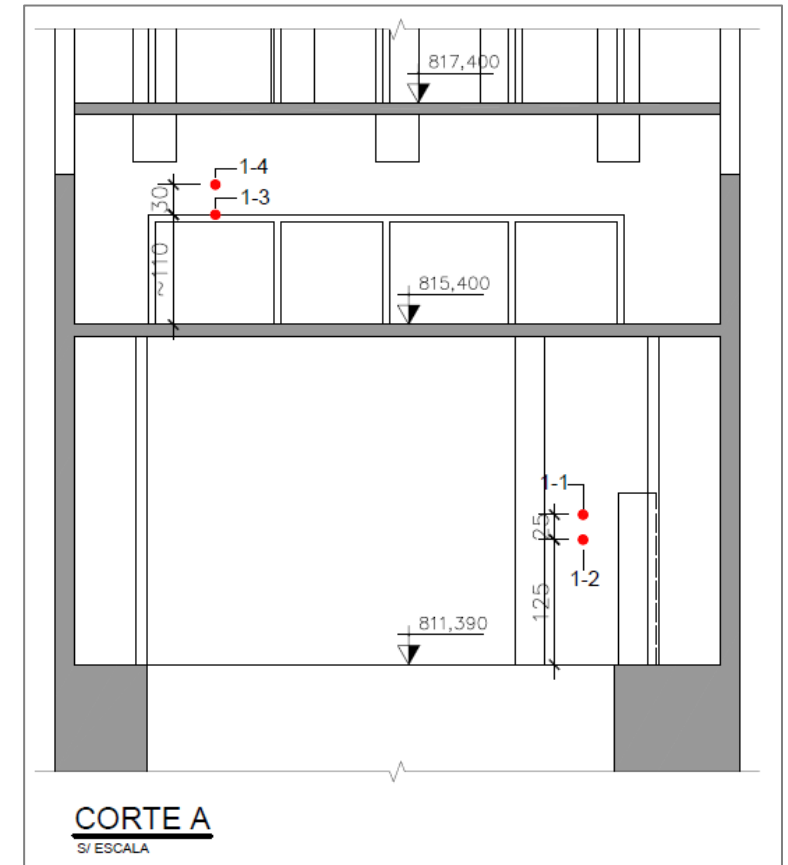
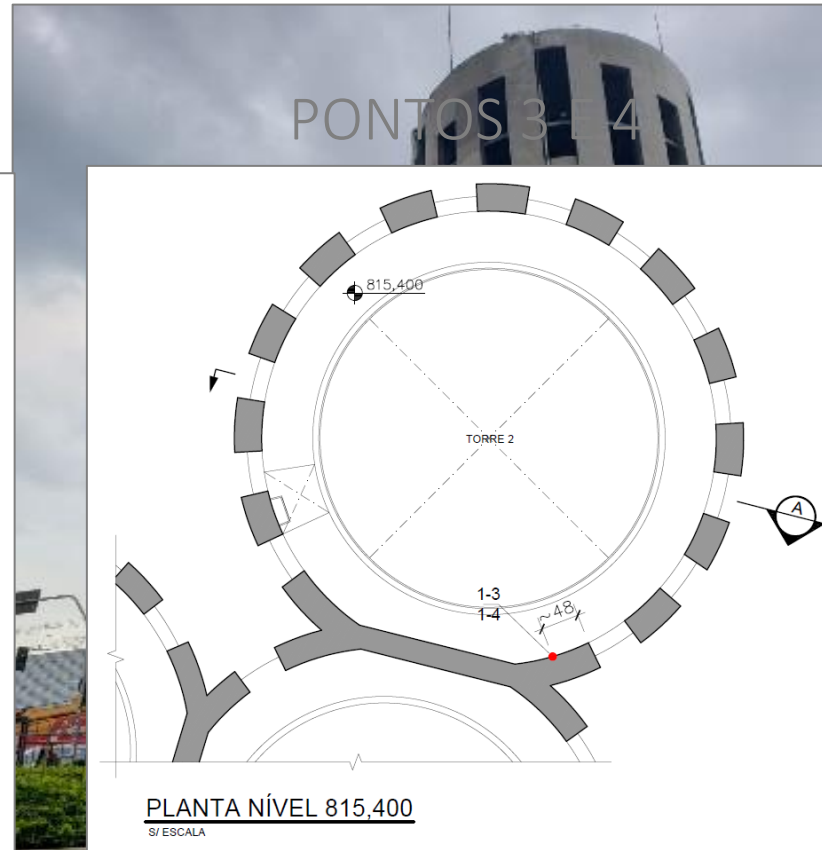
# ENSAIO DE CAMPO 1

- VENTILAÇÃO DA LINHA 1 – AZUL CONSTRUÍDA ENTRE 1973/1974
- fck 15 MPa E COBRIMENTO DE 2 cm

PONTOS 1 E 2



PONTOS 3 E 4



# ENSAIO DE CAMPO 1

- CORTE MANUAL DO CONCRETO
- REGIÃO DE ALTO TRÁFEGO DE VEÍCULOS



PONTOS DE ENSAIO REALIZADOS NA REGIÃO INFERIOR DA TORRE DE VENTILAÇÃO

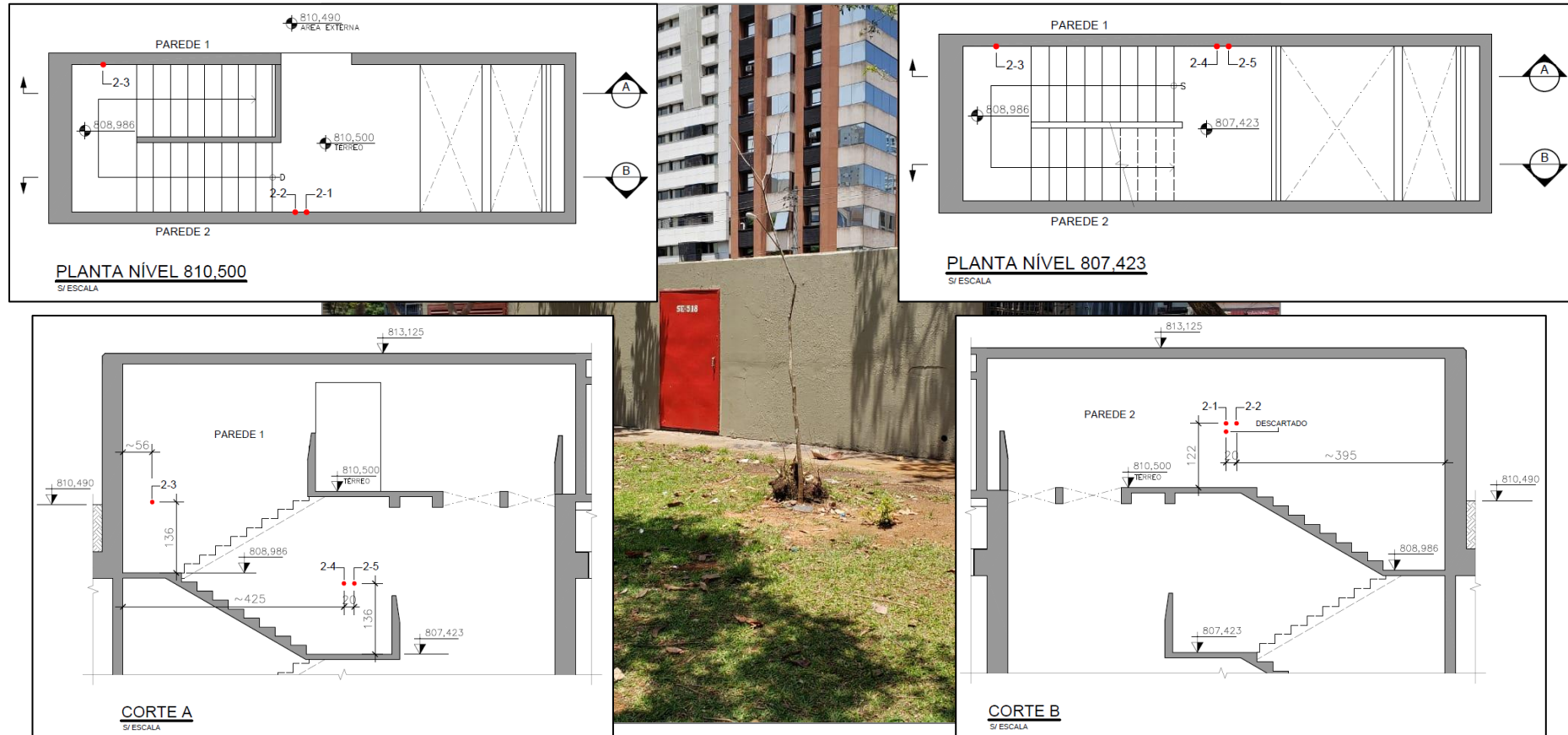


PONTOS DE ENSAIO REALIZADOS NA REGIÃO SUPERIOR DA TORRE DE VENTILAÇÃO



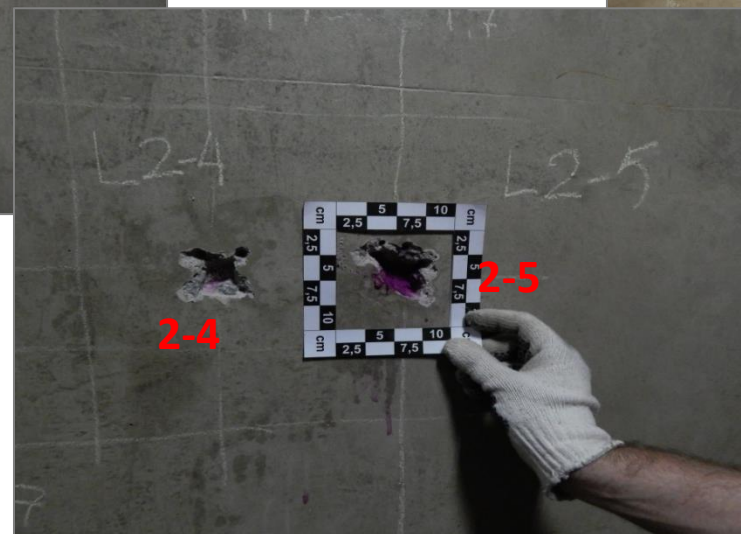
# ENSAIO DE CAMPO 2

- VENTILAÇÃO DA LINHA 2 – VERDE CONSTRUÍDA NO ANO DE 2005
- fck 30 MPa E COBRIMENTO DE 3 cm



## ENSAIO DE CAMPO 2

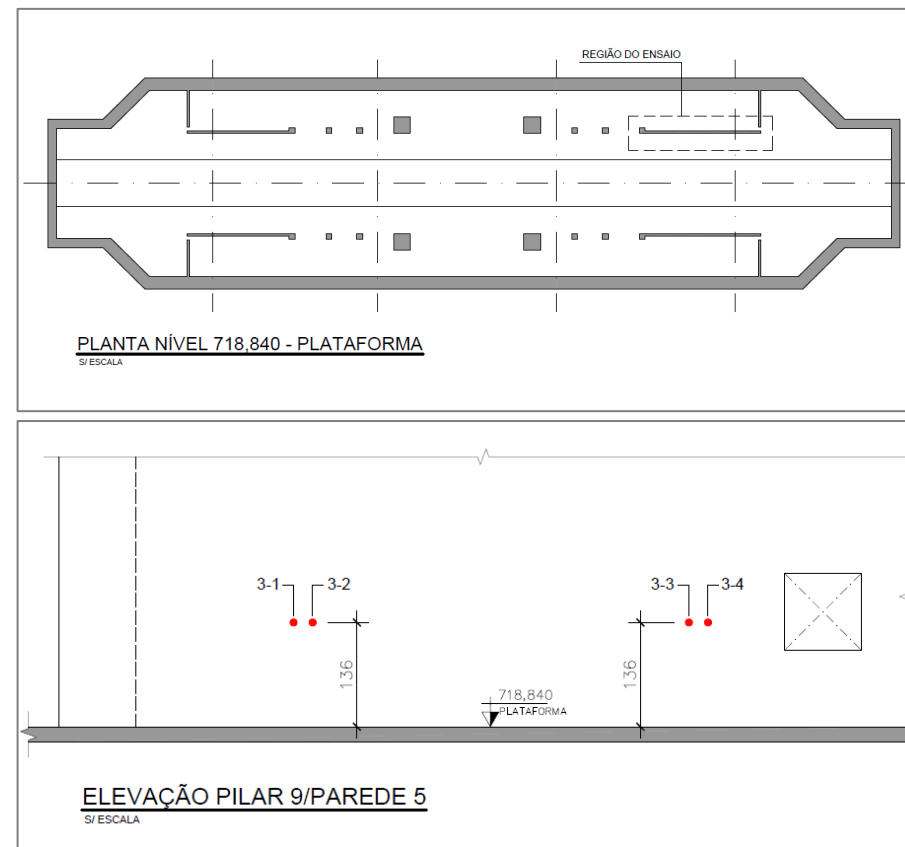
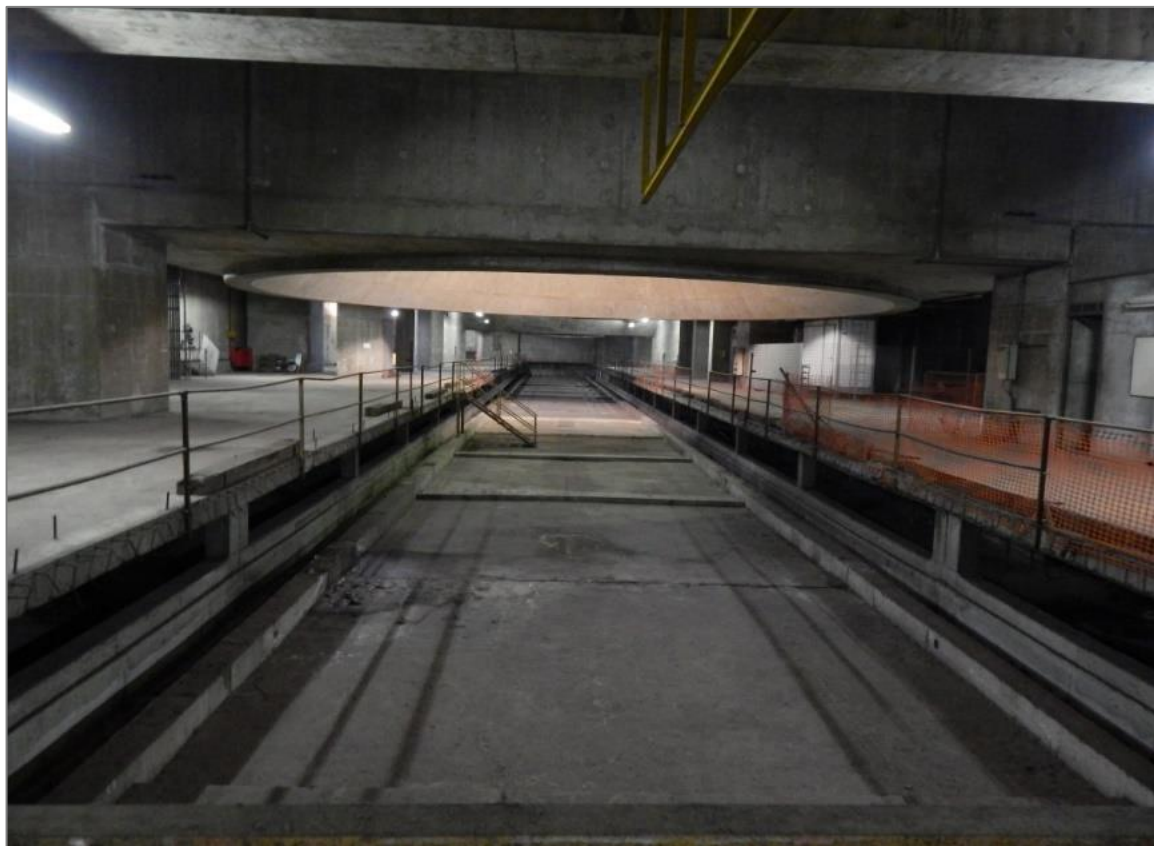
- CORTE MECÂNICO DO CONCRETO (MARTELETE)
- PAREDES COM VERNIZ APLICADO





# ENSAIO DE CAMPO 3

- ESTAÇÃO DA LINHA 3 – **VERMELHA** CONSTRUÍDA ENTRE 1979 E 1980
- $f_{ck}$  15 MPa E COBRIMENTO DE 2 cm (INACABADA)



# ENSAIO DE CAMPO 3

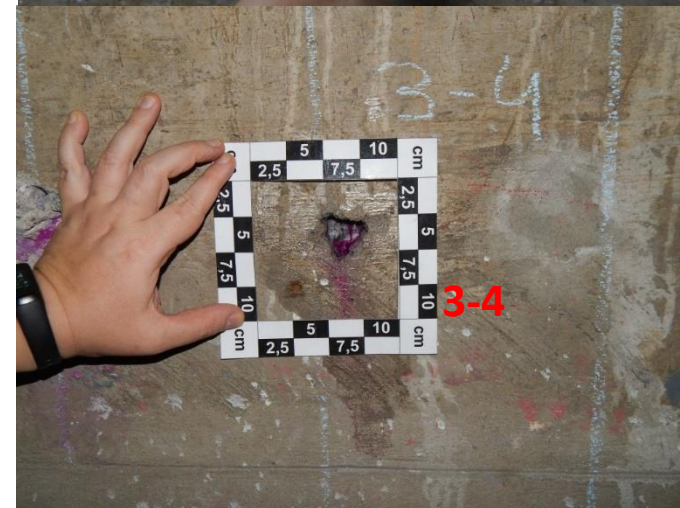
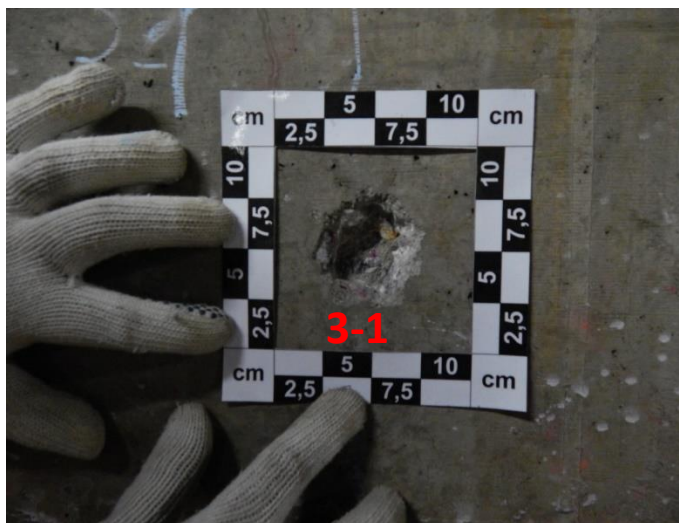


VISTA GERAL DA PAREDE ESCOLHIDA PARA ENSAIO



# ENSAIO DE CAMPO 3

- CORTE MECÂNICO DO CONCRETO (MARTELETE)

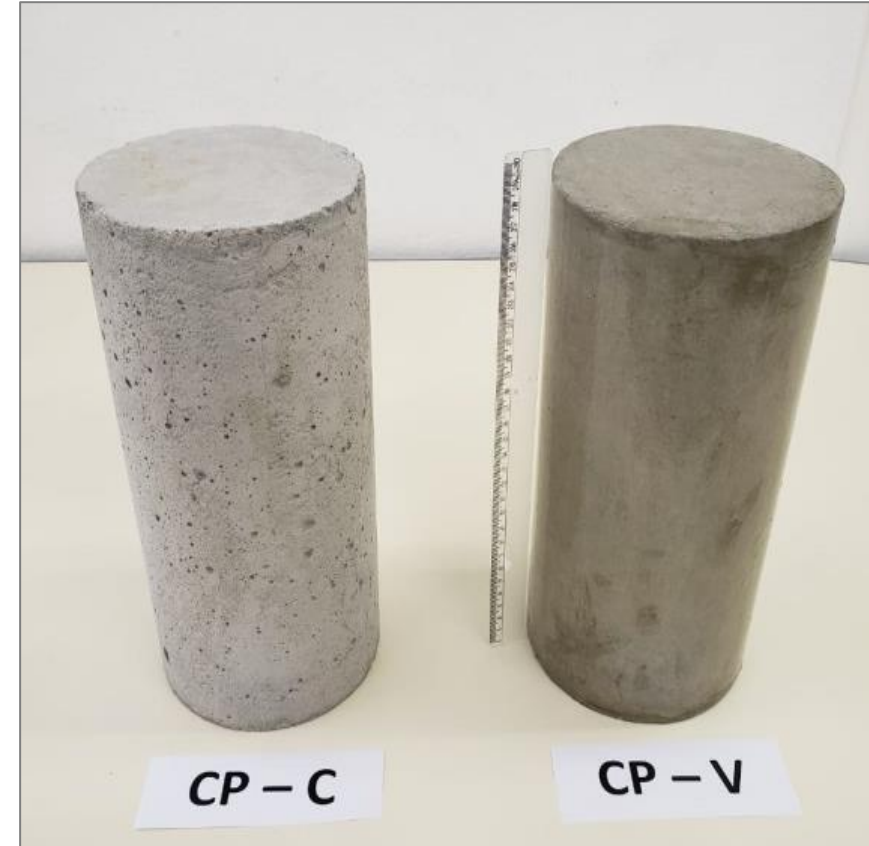


# ENSAIO LABORATORIAL

- ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA
- DOIS CORPOS DE PROVA 15x30
- $f_{ck}$  35 MPa
- Fator A/C 0,548

CP-C - CONTROLE

CP-V - COM APLICAÇÃO DE VERNIZ



# ENSAIO LABORATORIAL

## CAMARA DE CARBONATAÇÃO ACELERADA



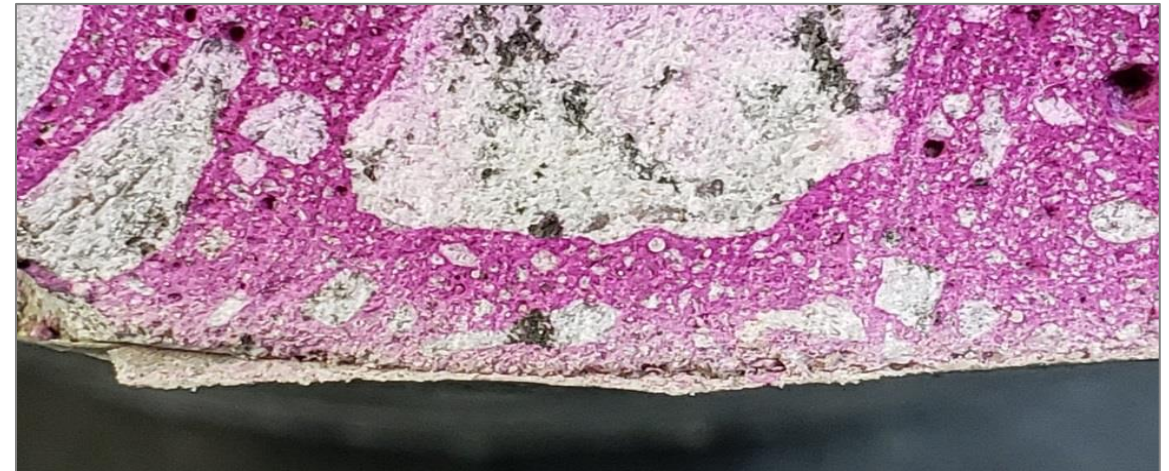
- DURAÇÃO: 8 semanas
- TEMPERATURA: 23+/-2°C
- UMIDADE: 65 +/-5%
- TEOR DE CO<sub>2</sub>: 5+/-1%



# RESULTADOS



CP-C



CP-V

Corpo de Prova	Profundidade de Carbonatação (mm)				Média (mm)
	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	
CP-C	14,0	16,0	18,0	16,0	16,0
CP-V	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



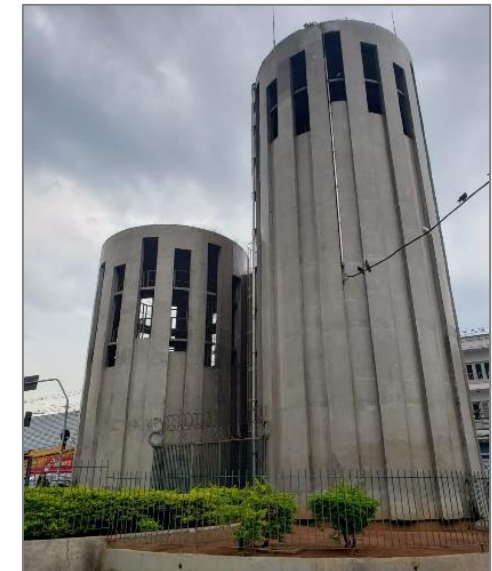
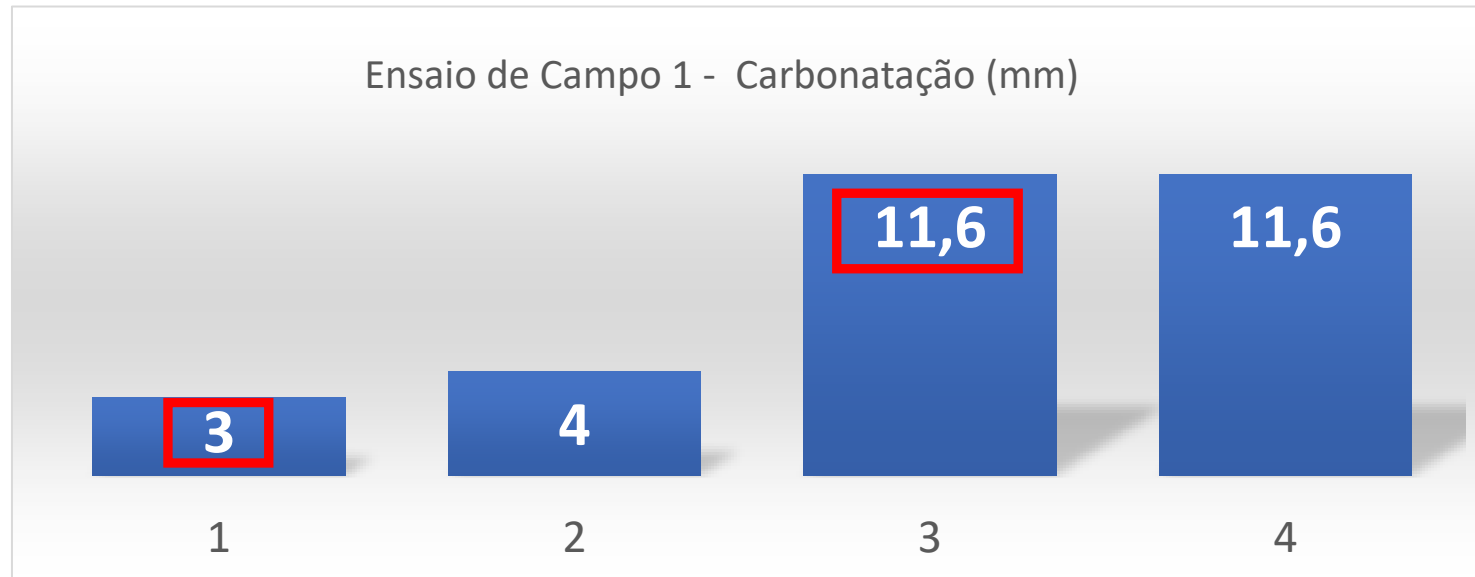
# RESULTADOS

Ventilação **Linha 1**

Idade: 46 anos

$f_{ck}$  15 MPa

Cob. 20 mm



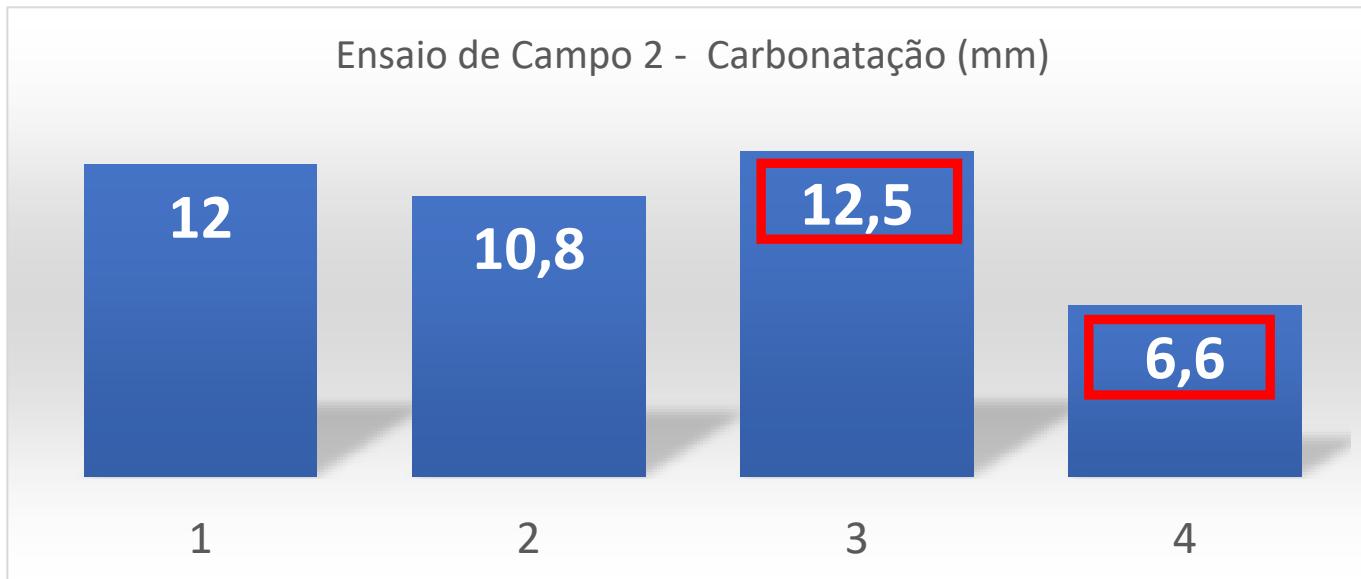
# RESULTADOS

Ventilação **Linha 2**

Idade: 16 anos

fck 30 MPa

Cob. 30 mm





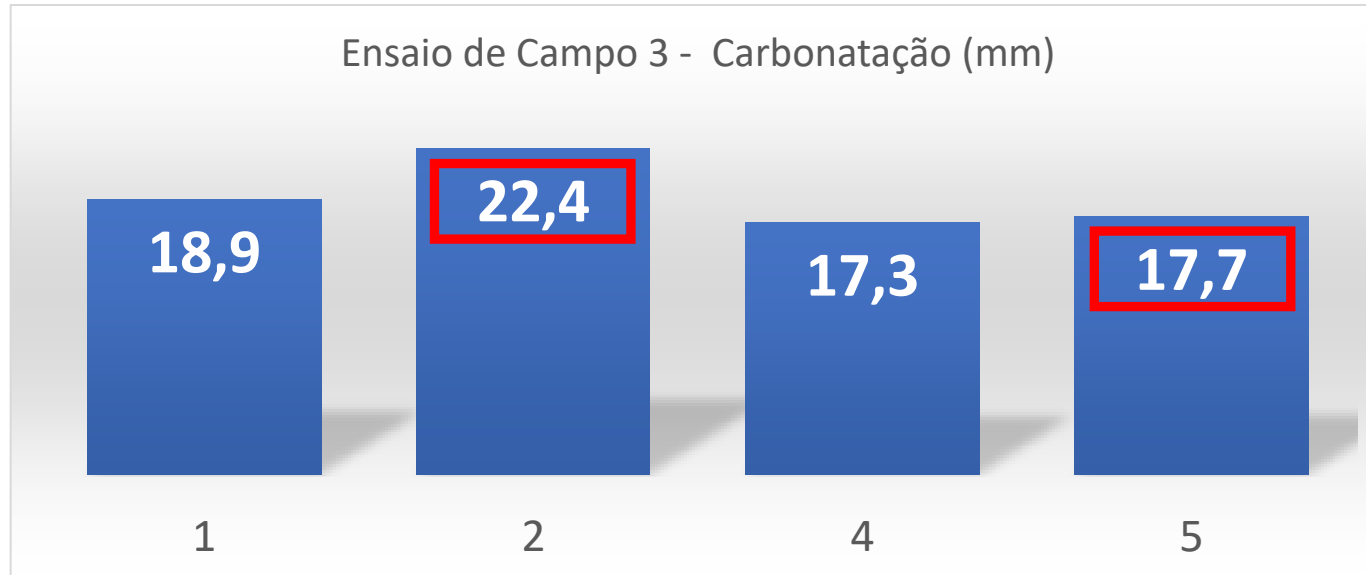
# RESULTADOS

Estação **Linha 3**

Idade: 41 anos

fck 15 MPa

Cob. 20 mm



## FORMULAÇÃO DE TUUTTI

$$e_c = k \cdot \sqrt{t}$$

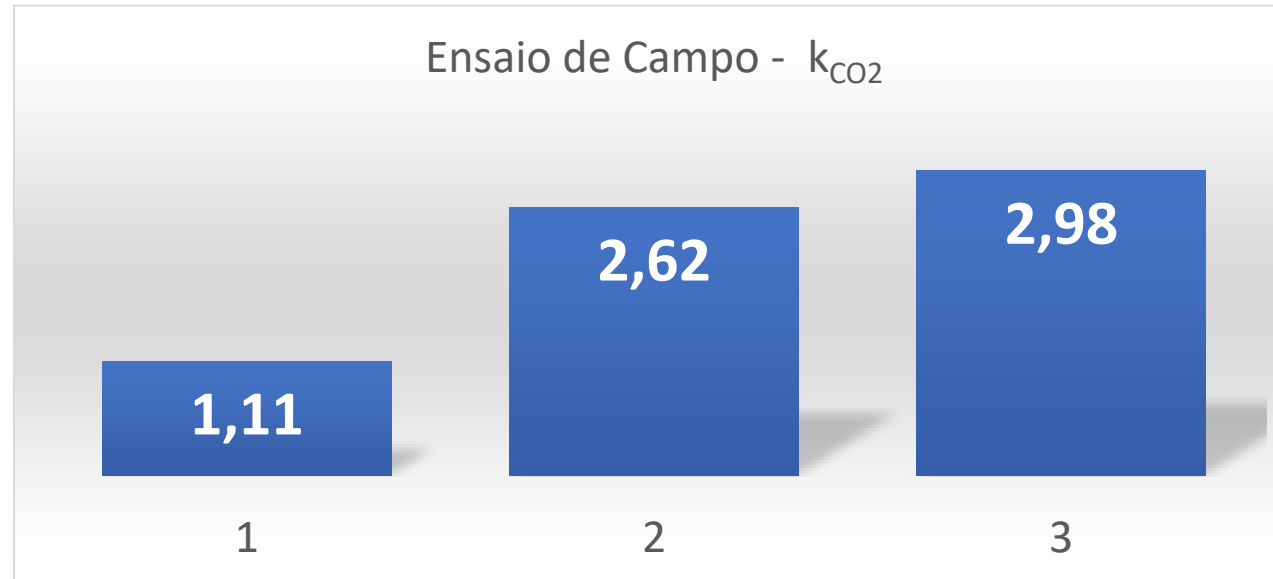
- $e_c$  – média dos valores obtidos por estrutura
- $t$  – conhecido (idade de construção das estruturas)

## FORMULAÇÃO DE POSSAN (2010)

$$y = k_c \left( \frac{20}{f_c} \right)^{k_{\neq}} \cdot \left( \frac{t}{20} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ \left( \frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left( \frac{k_{co_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left( \frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce}$$



# RESULTADOS



## Ventilação **Linha 1**

Idade: 46 anos

fck 15 MPa

Cob. 20 mm

## Ventilação **Linha 2**

Idade: 16 anos

fck 30 MPa

Cob. 30 mm

## Estação **Linha 3**

Idade: 41 anos

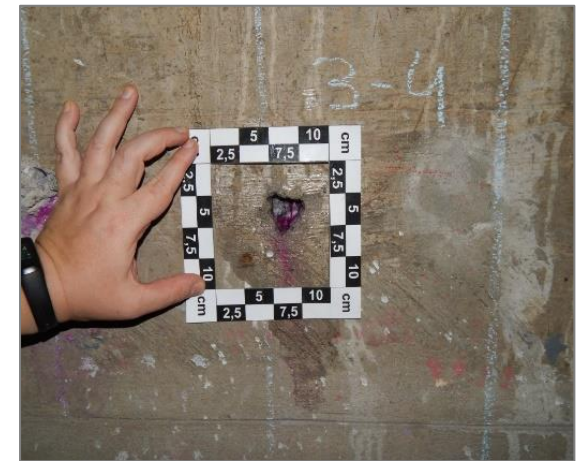
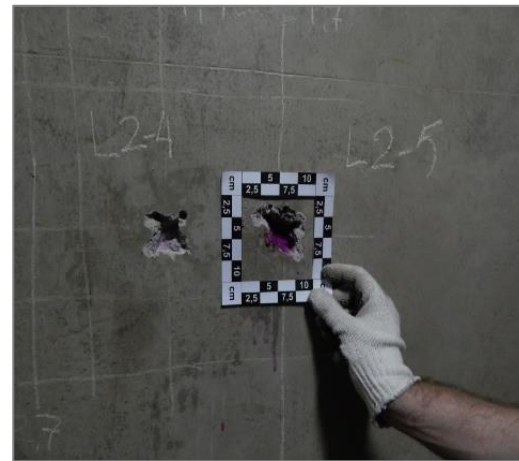
fck 15 MPa

Cob. 20 mm



# RESULTADOS

Ensaio	Idade (anos)	Espessura (mm)	$k_{CO_2}$	Cob. de projeto (mm)	VU residual (anos)
1	46	7,6	1,1	20,0	276,8
2	16	10,5	2,6	30,0	115,2
3	41	19,1	3,0	20,0 (30,0)*	4,1 (67,3)*



# RESULTADOS

Corpo de Prova	$e_c$ (mm)
CP-C	16,0

## SimulaCarb - Determinístico

Conhecido

Informações da estrutura	FC <sub>28 dias</sub> (MPa):	35
	Tipo de cimento:	CP III AF
	Tipo de adição:	sem adição
	Teor de adição (%):	0
	Idade estrutura (anos):	32
	Cobrimento (mm):	35
Ambiente Exposição	Teor de CO <sub>2</sub> (%):	0,035
	Umidade (%):	73
	Proteção à chuva:	Interior

Estimado

### Simulação da Profundidade de carbonatação do concreto

Nome da Estrutura:	Concreto sem verniz		
Tipo da estrutura:	Concreto armado		
Ano de construção:	2020	Data simulação:	03/02/21
Classe de exposição:	Moderada		
Obersvações:			

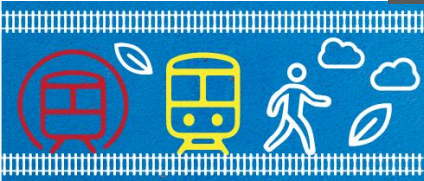
Tempo estimado para carbonatação:	151,5	Anos
Profundidade de carbonatação Estimada:	16,08	mm

Ensaio

$$k = \frac{e_c}{\sqrt{t}} \rightarrow k = \frac{16}{\sqrt{32}} \rightarrow k = 2,83$$



# RESULTADOS



# CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Vida Útil estimada atende às especificações atuais do Metrô. Atenção deve ser dada manutenção da estrutura da Linha 3
- Aplicação de verniz apresentou potencial na inibição do agente agressivo CO<sub>2</sub> no concreto, conforme ensaio de laboratório
- Não foi observada relação entre os valores  $k_{CO_2}$  obtidos e o  $f_{kc}$  dos concretos analisados
- Os resultados dos ensaios em uma mesma estrutura apresentaram grande variabilidade



# RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação da eficiência da aplicação de verniz na proteção de estruturas com frente de carbonatação já instalada
- Avaliação comparativa da frente de carbonatação de elementos com e sem verniz de uma mesma estrutura
- Estudos com avaliação experimental do  $k_{CO_2}$  devem contemplar planejamento das posições e quantidade dos ensaios que permitam avaliação estatística dos resultados





# AGRADECIMENTOS

À Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) pela autorização de uso das suas dependências para realização do trabalho

À Gerência de Manutenção do Metrô, em especial à engenheira Natália Brito Silva Rodrigues, pela imprescindível colaboração na viabilização e execução dos ensaios

Ao Consórcio Tiisa-Comsan e à engenheira Natália Thais Batista Fakoury da Gerência de Expansão do Metrô pelo fornecimento e preparação dos corpos de prova utilizados neste trabalho

Ao laboratório da ABCP pelo apoio prestado na execução dos ensaios laboratoriais

A engenheira Audrey Gregori pelo incentivo e apoio a realização deste trabalho



**27<sup>a</sup>** SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

***OBRIGADO!***



**27<sup>a</sup>** SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

REALIZAÇÃO  
**AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

14 a 17  
setembro  
2021

27ª SEMANA DE TECNOLOGIA  
METROFERROVIÁRIA

## TRILHOS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL

Estudo dos coeficientes de  
carbonatação dos concretos de  
diferentes linhas do Metrô de São Paulo

Tatiana de Cassia Coutinho da Fonseca  
Marcelo Gabriel Capacá

REALIZAÇÃO

 **AEAMESP**  
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ

  
8ª SEMANA  
TECNOLOGIA &  
DESENVOLVIMENTO  
METROFERROVIÁRIOS  
ANP TRILHOS  
CONSELHO NACIONAL  
DE TRANSPORTES