ESTUDO COMPARATIVO DOS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO (K) DOS CONCRETOS DE ESTRUTURAS DO METRÔ DE SÃO PAULO COM DIFERENTES IDADES

SÃO PAULO

2021

GERFESSON DE OLIVEIRA

MARCELO GABRIEL CAPACLA

TATIANA DA FONSECA

ESTUDO COMPARATIVO DOS COEFICIENTES DE CARBONATAÇÃO (K) DOS CONCRETOS DE ESTRUTURAS DO METRÔ DE SÃO PAULO COM DIFERENTES IDADES

Trabalho de Conclusão do Curso de Pós Graduação em Patologia nas Obras Civis para obtenção do grau de especialista.
Prof. Orientador: Luis César S. De Luca, M.Sc.

SÃO PAULO

2021

AGRADECIMENTO

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

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

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

A Flavio Munhoz e Mauricio Pires, respectivamente Supervisor e Coordenador do laboratório da ABCP pelo apoio prestado na execução dos ensaios laboratoriais.

A engenheira Audrey Gregori pelo incentivo e apoio a realização deste curso.

Ao nosso orientador prof. De Luca e demais professores e coordenadores do curso de Patologia nas Obras Civis pela colaboração, ensinamentos e experiências passadas ao longo do curso.

E às nossas famílias pelo apoio, incentivo e paciência durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho possui como objetivo geral a comparação do coeficiente de carbonatação (k_{CO2}) dos concretos do Metrô de São Paulo com diferentes idades. Como objetivo específico, se propõe a prever a vida útil das estruturas analisadas com base em ensaios experimentais e modelos analíticos encontrados na literatura e ainda avaliar a influência do tratamento superficial empregado no concreto nas estruturas do Metrô no avanço da frente de carbonatação. A realização desta pesquisa se justifica pela importância técnica, econômica e social da previsibilidade da deterioração das estruturas pelo processo de carbonatação, como forma de alocar recursos e planejar as intervenções necessárias no sistema metroviário sem afetar a circulação dos trens e gerar transtornos aos usuários. Para este trabalho, foi feito um estudo de caso em estruturas existente do Metrô, selecionadas pelos critérios de ano de construção e disponibilidade para realização dos ensaios. Foram realizados ensaios de campo, com remoção do concreto e aplicação de indicador de pH (solução de fenolftaleína) para determinação das profundidades da frente de carbonatação. Também foram utilizados corpos de prova de concreto obtidos em obras em construção pelo Metrô para verificação, em laboratório, da eficiência da película protetora antipichação para evitar o processo de carbonatação da estrutura. Os resultados obtidos são comparados para a comprovação da hipótese inicial proposta, sendo ainda apresentadas propostas para futuros estudos e trabalhos.

Palavras chave: carbonatação, despassivação, Metrô, vida útil

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 10
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA 13
1.2 OBJETIVOS 13
1.2.1 Objetivo Geral 13
1.2.2 Objetivos Específicos 13
1.3 HIPÓTESE 14
1.4 JUSTIFICATIVAS 14
1.4.1 Tecnológica 14
1.4.2 Social 15
1.4.3 Econômica 16
1.4.4 Ecológica 17
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 17
1.6 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO 18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1 DURABILIDADE 20
2.2 PROCESSO DE CARBONATAÇÃO E SUA AVALIAÇÃO 26
2.3 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL 34
3. ESTUDO DE CASO 37
3.1 ENSAIOS DE CAMPO 37
3.1.1 Ensaio de campo 1 38
3.1.2 Ensaio de campo 2 45
3.1.3 Ensaio de campo 3 52
3.2 ENSAIO LABORATORIAL 57
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 61

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO REALIZADOS EM CAMPO 61
4.2 RESULTADOS DO ENSAIO LABORATORIAL DE CARBONATAÇÃO ACELERADA 64
5. CONSIDERAÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 67
5.1 COSIDERAÇÕES FINAIS 67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-EVOLUÇÃO CONCEITUAL DO PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO (POSSAN, 2010)..... 11
FIGURA 2 - PROCESSO DE CARBONATAÇÃO, COM POROS PARCIALMENTE PREENCHIDOS..... 28
FIGURA 3 - PORCENTAGEM DE CARBONATAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AMBIENTE (VENUAT, 1977 *APUD* CASCUDO & CARASEK, 2011, P.857)..... 29
FIGURA 4 - TESTEMUNHO CARBONATADO (A) E NÃO CARBONATADO (B) 30
FIGURA 5 - APLICAÇÃO DE INDICADOR COLORIMÉTRICO EM AMOSTRA: TIMOLFTALEÍNA EM AZUL E FENOLFTALEÍNA EM VERMELHO CARMIM (CASCUDO, 1997 *APUD* CASCUDO & CARASEK, 2011, P. 873)..... 31
FIGURA 6 - PILAR COM APLICAÇÃO DE VERNIZ ANTIPICHAÇÃO SOBRE A SUPERFÍCIE DO CONCRETO (FONTE: AUTOR, 2013). 33
FIGURA 7 - TORRES DA ESTRUTURA DE VENTILAÇÃO..... 38
FIGURA 8 – PLANTA DA ESTRUTURA DE VENTILAÇÃO DA LINHA 1 – AZUL (TÉRREO)..... 39
FIGURA 9 – PLANTA DA ESTRUTURA DE VENTILAÇÃO DA LINHA 1 – AZUL (PATAMAR SUPERIOR)..... 39
FIGURA 10 – CORTE B, COM DESTAQUE AOS PONTOS ENSAIADOS NOS DOIS NÍVEIS 40
FIGURA 11 - DETECÇÃO E MARCAÇÃO DAS ARMADURAS NA REGIÃO DO ENSAIO..... 40
FIGURA 12 - INÍCIO DO PROCESSO DE CORTE DO CONCRETO..... 41
FIGURA 13 - PONTOS 1-1 E 1-2 ONDE FOI RETIRADO O CONCRETO E REALIZADOS OS ENSAIOS 41
FIGURA 14 - DETALHE DAS DIMENSÕES DO CORTE, COM O INDICADO DE PH JÁ APLICADO 42
FIGURA 15 - MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO..... 42
FIGURA 16 - REGIÃO DE ENSAIO LIMPA E COM POSIÇÃO DAS ARMADURAS LOCADAS..... 43
FIGURA 17 - LIMPEZA DO CORTE COM PINCEL..... 43
FIGURA 18 - PONTO 1-3 COM SOLUÇÃO DE FENOLFTALEÍNA APLICADA, AGUARDANDO PARA EFETUAR MEDIÇÃO 44
FIGURA 19 - DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DE ENSAIO 1-3 E 1-4 44
FIGURA 20 - MEDIÇÃO DO PONTO 1-4 ATRAVÉS DE PAQUÍMETRO E RÉGUA METÁLICA 45
FIGURA 21 - VISTA GERAL DA ESTRUTURA DA LINHA 2-VERDE 45
FIGURA 22 – PLANTA DA ESTRUTURA DE VENTILAÇÃO DA LINHA 2-VERDE (TÉRREO) 46
FIGURA 23 – PLANTA DA ESTRUTURA DE VENTILAÇÃO DA LINHA 2-VERDE (PATAMAR INFERIOR) 46
FIGURA 24 – CORTE A COM DESTAQUE PARA OS PONTOS ENSAIADOS 2-3, 2-4 E 2-5..... 47
FIGURA 25 – CORTE B COM DESTAQUE PARA OS PONTOS ENSAIADOS (2-1 E 2-2) 47
FIGURA 26 - DETECÇÃO E MARCAÇÃO DAS ARMADURAS ATRAVÉS DE PACÔMETRO..... 48
FIGURA 27 - MARCAÇÃO DA POSIÇÃO DAS ARMADURAS 48
FIGURA 28 - INÍCIO DO CORTE DO CONCRETO NO PONTO 2-1..... 49
FIGURA 29 - PONTO 2-1 COM SOLUÇÃO DE FENOLFTALEÍNA JÁ APLICADA..... 49
FIGURA 30 - PAREDE ENSAIADA COM OS PONTOS 2-1 E 2-2..... 50
FIGURA 31 - REMOÇÃO DO CONCRETO PARA O ENSAIO 2-3..... 50
FIGURA 32 - ENSAIO 2-3 TOTALMENTE CARBONATADO..... 51
FIGURA 33 - MARCAÇÃO PARA OS ENSAIOS 2-4 E 2-5 51

FIGURA 34 - DISPOSIÇÃO DOS ENSAIOS 2-4 E 2-5 52
FIGURA 35 - VISTA GERAL DA ESTAÇÃO ENTERRADA 52
FIGURA 36 – PLANTA GERAL DA ESTAÇÃO DA LINHA 3-VERMELHA NO NÍVEL DA PLATAFORMA 53
FIGURA 37 – PLANTA DA AMPLIAÇÃO DA PAREDE ENSAIADA, COM A LOCAÇÃO DOS PONTOS 3-1 A 3-4 53
FIGURA 38 – ELEVAÇÃO DA PAREDE ENSAIADA 53
FIGURA 39 - PAREDE ONDE FORAM REALIZADOS OS ENSAIOS 54
FIGURA 40 - MARCAÇÃO DAS ARMADURAS E DOS PONTOS DE ENSAIO 3-1 E 3-2 54
FIGURA 41 - ROMPIMENTO DO CONCRETO NO PONTO 3-1 55
FIGURA 42 - PONTO DE ENSAIO 3-1E 3-2 55
FIGURA 43 - MARCAÇÃO DAS ARMADURAS E DOS PONTOS DE ENSAIO 3-3 E 3-4 56
FIGURA 44 - PONTOS DE ENSAIO 3-3 E 3-4 56
FIGURA 45 - CORPOS DE PROVA UTILIZADOS EM ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA. 57
FIGURA 46 - CÂMARA DE CARBONATAÇÃO DO LABORATÓRIO DA ABCP, COM OS PARÂMETROS UTILIZADOS NO ENSAIO 58
FIGURA 47 - SEÇÃO SERRADA DO CORPO DE PROVA CP-C, COM DESTAQUE PARA A REGIÃO CENTRAL NÃO CARBONATADA (VERMELHO CARMIM) 59
FIGURA 48 - DETALHE DA ESPESSURA CARBONATADA (REGIÃO NÃO PIGMENTADA) 59
FIGURA 49 - SEÇÃO SERRADA DO CORPO DE PROVA CP-V, COM TODA SEÇÃO CENTRAL NÃO CARBONATADA (VERMELHO CARMIM) 60
FIGURA 50 - DETALHE DO CORPO DE PROVA CP-V, ONDE SE OBSERVA A PELÍCULA DO VERNIZ 60
FIGURA 51 – PLANILHA DE SIMULAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO CONFORME MODELO DE POSSAN (2010). 65
FIGURA 52 - VARIAÇÃO DE K_{CO2} COM O FCK NOS ENSAIOS REALIZADOS. 65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- GASTOS EM PAÍSES DESENVOLVIDOS COM MANUTENÇÃO (MEDEIROS *ET AL*, 2011, P. 775) 16
TABELA 2 - CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL CAA (ABNT NBR 6118, 2014). 22
TABELA 3 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E A QUALIDADE DO CONCRETO (ABNT NBR 6118, 2014). 22
TABELA 4 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE CLASSE DE AGRESSIVIDADE E COBRIMENTO NOMINAL (ABNT NBR 6118, 2014). 23
TABELA 5 - DEFINIÇÃO DE CLASSE RELACIONADA A CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO AMBIENTAL CONFORME EN 1992 1-1 (2004). 24
TABELA 6 - DEFINIÇÃO DE CLASSE ESTRUTURAL CONFORME EN 1992 1-1 (2004). 25
TABELA 7 – COBRIMENTO MÍNIMO PARA ATENDIMENTO A REQUISITOS DE DURABILIDADE PARA CONCRETO ARMADO CONFORME EN 1992 1-1 (2004). 25
TABELA 8 – COBRIMENTO MÍNIMO PARA ATENDIMENTO A REQUISITOS DE DURABILIDADE PARA CONCRETO PROTENDIDO CONFORME EN 1992 1-1 (2004). 25
TABELA 9 - CONCENTRAÇÃO DE CO_2 NO AR EM RELAÇÃO A ALGUNS TIPOS DE AMBIENTES (NEVILLE, 1997 *APUD* CASCUDO & CARASEK, 2011, P. 856). 29
TABELA 10 - COEFICIENTES DO MODELO DE POSSAN (2010) EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO E CONDIÇÕES AMBIENTAIS. 36
TABELA 11 - COEFICIENTES DO MODELO DE POSSAN (2010) EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO E CONDIÇÕES DE EXPOSIÇÃO. 36
TABELA 12 - ESPECIFICAÇÕES DO CONCRETO UTILIZADO NA MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA 57
TABELA 13 - PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO OBTIDAS NO ENSAIO DE CAMPO 1 61
TABELA 14 - PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO OBTIDAS NO ENSAIO DE CAMPO 2. 62
TABELA 15 - PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO OBTIDAS NO ENSAIO DE CAMPO 3. 62
TABELA 16 - MÉDIAS, DESVIOS E VARIÂNCIAS DOS ENSAIOS DE CAMPO. 63
TABELA 17 - CÁLCULO DE COEFICIENTE KCO2 E ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL RESIDUAL. 64
TABELA 18 - PROFUNDIDADES DE CARBONATAÇÃO MEDIDAS. 64

1. INTRODUÇÃO

As linhas que operam sobre trilhos da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) são compostas por túneis de via e unidades construtivas como Estações, Acessos, Ventilações, Saídas de Emergência e Edifícios Técnicos. São objeto deste estudo, uma estação e duas ventilações. As estações são unidades acessíveis ao público em geral onde ocorrem, principalmente, o ingresso/egresso da área paga e o embarque/desembarque dos trens. Ventilações são unidades não acessíveis ao público geral que abrigam equipamentos de ventilação cuja função é manter o conforto térmico nos túneis de via e garantir fluxo adequado de ar na ocorrência de evento que gere fogo e/ou fumaça na via. Ambas as unidades têm estrutura principal em concreto armado. O Metrô adota o concreto aparente como acabamento padrão nestas estruturas com aplicação de verniz antipichação em faces externas e internas de espaços acessíveis ao público geral. A durabilidade do concreto é fator essencial para garantia da vida útil das estruturas do Metrô.

Mehta e Monteiro (2008), na apresentação da terceira edição do seu livro "Concreto – Microestrutura Propriedades e Materiais" o dedicam a "... integrantes da comunidade do concreto que se deparam com desafios para ampliar os usos desse material a novas fronteiras da civilização humana, bem como torna-lo mais durável, sustentável e ambientalmente correto" (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Desta forma, os autores, desde as primeiras páginas de sua publicação adotada como material didático em muitas de nossas universidades, já explicitam a relevância de dois temas correlatos que justificam grande parte das pesquisas atuais em concreto: durabilidade e sustentabilidade. Os mesmos indicam, ainda, a necessidade de que engenheiros atentem para a durabilidade do concreto tanto quanto para suas propriedades mecânicas tendo em vistas as implicações socioeconômicas da durabilidade, exemplificando que em países industrialmente desenvolvidos, cerca de 40% do total de recursos da indústria da construção estão sendo empregados em reparo e manutenção das estruturas existentes. Incontestavelmente, os requisitos de resistência se configuraram como

preponderantes em relação aos demais quando da invenção do concreto armado e assim se mantiveram ao longo de muitos anos, em parte pela limitação de conhecimento e em parte pelos anseios da sociedade à época. Esses fatores sofrem mudanças continuamente e impactam no desenvolvimento de novos projetos como bem ilustrado na Figura 1.

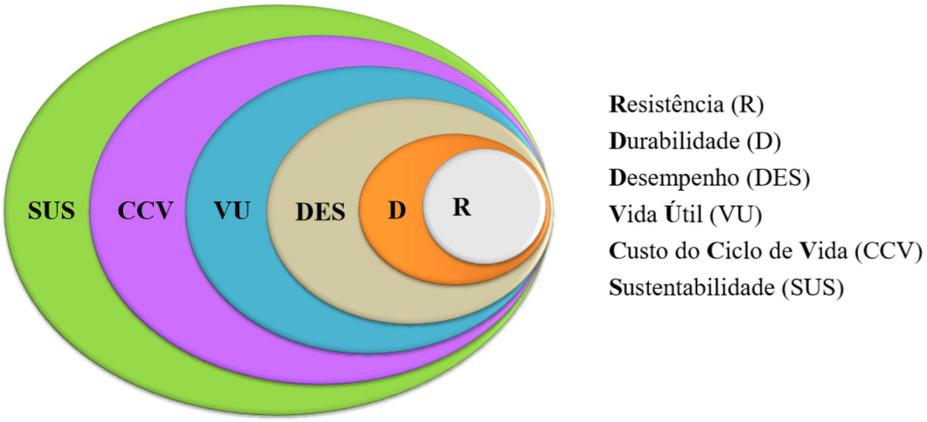


Figura 1-Evolução conceitual do projeto de estruturas de concreto (POSSAN, 2010).

A princípio apenas especificações relacionadas à resistência (R) pareciam ser suficientes em um estágio de conhecimento em que o concreto era tido como praticamente eterno à semelhança de uma rocha. O surgimento de manifestações patológicas serviu para demonstrar que este material estava sujeito à degradação e que, portanto, era necessário atentar para a sua durabilidade (D). Conforme Medeiros et al. (2011), a durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção não se tratando de uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura armadura ou ao concreto. Prosseguindo na linha de evolução, percebeu-se a importância de haver parâmetros para o comportamento em uso daí decorrendo o conceito de Desempenho (DES) que aliado à variável tempo remete à Vida Útil (VU).

Segundo a ISO 13823 (2008) apud Medeiros et al. (2011), entende-se por vida útil “o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo”. Possan (2010) aponta que em

função de fatores como a necessidade de preservação do meio ambiente, custos e competitividade estamos experimentando uma nova mudança na forma de conceber as estruturas em que se demanda uma visão holística das mesmas associadas a seu Ciclo de Vida e ao Custo do Ciclo de Vida (CCV).

A busca pela assimilação, disseminação e aplicação desses novos conceitos se observam em função do número crescente de pesquisas na área, desenvolvimento de modelos de previsão de vida útil, estabelecimento de critérios objetivos para avaliação da durabilidade (ACI 365.1R, 2000; FIB MODEL CODE, 2010) e, no Brasil, com o surgimento da norma de desempenho (ABNT NBR 15575, 2013). Contudo a principal norma brasileira, em se tratando de estruturas de concreto armado, a ABNT NBR 6118 (2014), ainda prescinde de abordagem específica em relação à durabilidade, não havendo nem mesmo, no seu conteúdo, menção à vida-útil associada aos critérios estabelecidos por ela.

A vida útil de projeto das estruturas da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô), objeto deste trabalho, é definida atualmente por uma Especificação Técnica interna (METRÔ, 2014) da empresa como 100 anos. Essa determinação coincide com a recomendação para edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil da EN 206-1 (2007) e, em ordem de grandeza, são coerentes com a recomendação de 120 anos para obras de arte e edifícios públicos novos da BS 7543 (1992) apud Medeiros et al. (2011). Em Metrô (2014) há também recomendações quanto a cobrimento mínimo (3,0 cm), limites para consumo de cimento (entre 300 kg/m^3 e 400 kg/m^3), fck mínimo (30 MPa para estruturas enterradas e 35 MPa para estruturas elevadas) dentre outras com nível de exigência igual ou superior ao das normas técnicas nacionais vigentes. Sendo assim, as estruturas recentes do Metrô refletem o conteúdo desta Especificação Técnica (METRÔ, 2014), porém o mesmo não se pode afirmar em relação àquelas construídas à época da implantação deste modal. Como exemplo, citam-se as estações Vergueiro, da Linha 1 (construída nos anos 70), e Estação Pedro II, da Linha 3 (construída nos anos 80), que foram projetadas com concreto de fck igual a 15 MPa e cobrimento de 2 cm.

Espera-se que as estruturas existentes do Metrô apresentem características diferentes em função da época de sua construção e das normas e especificações técnicas utilizadas em seus projetos que isto reflita em potenciais diversos de deterioração. Nos casos em que a principal causa de deterioração esteja relacionada à corrosão vinculada à carbonatação, este potencial pode ser avaliado por meio da determinação experimental da profundidade da frente de carbonatação vinculada à utilização de modelos matemáticos para estimativa de vida útil, como o proposto em Tuutti (1982), o que se configura na proposta deste trabalho.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O coeficiente de carbonatação, fator k da formulação de Tuutti (1982), dos concretos de estruturas do Metrô de São Paulo de diferentes idades e construídos conforme diferentes especificações possuem similaridade?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar o coeficiente de carbonatação (k_{CO2}) dos concretos de estruturas do Metrô de São Paulo com diferentes idades.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Prever a vida útil das estruturas existentes com base em ensaios experimentais e modelos analíticos;

b) Avaliar a influência do tratamento superficial empregado em estruturas do Metrô com acesso ao público no avanço da frente de carbonatação.

1.3 HIPÓTESE

Uma vez que as estruturas do Metrô de São Paulo foram executadas em diferentes épocas e construídas segundo diferentes especificações técnicas, supõe-se que haja variação nos coeficientes de carbonatação (k_{co2}).

1.4 JUSTIFICATIVAS

Abaixo são descritos as justificativas e motivos pelos quais será realizada a pesquisa.

1.4.1 Tecnológica

Ao longo dos últimos 40 anos a Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) vem construindo e operando as estações, túneis, poços de ventilação e demais estruturas necessárias para a circulação dos trens e seus usuários. A implantação das linhas se iniciou nos anos 70, com a construção da Linha 1, ligando o bairro de Santana ao Jabaquara. No fim desta década e ao longo dos anos 80 implantou-se a Linha 3, ligando o bairro da Barra Funda ao extremo leste da cidade. E ao longo dos anos 90 implantou-se a Linha 2, ligando a Vila Prudente à Vila Madalena (WIKIPÉDIA,2019).

Durante todo esse período ocorreu uma grande evolução das Normas Técnicas para o projeto e execução das estruturas de concreto de um modo geral e também das especificações internas do Metrô, agregando novas tecnologias e exigências quanto à durabilidade e manutenção.

Atualmente as especificações técnicas do Metrô, que fazem parte do conjunto de documentos de contratação de suas obras, estabelece como referência uma vida útil de projeto (VUP) de 100 anos (METRÔ, 2014, p.12). Essas especificações já foram utilizadas em suas obras mais recentes, as Linhas 4, 5, 15 e 17.

Em função destas diferenças de especificações para execução é necessário avaliar se as estruturas existentes, executadas em diferentes épocas e com diferentes tipos de concreto e cobrimento, conduzem ao atendimento da VUP atualmente exigida, ou ainda qual a expectativa de tempo para que as eventuais frentes de carbonatação atuantes atinjam as armaduras, indicando assim uma previsão de vida útil antes de maiores intervenções.

1.4.2 Social

A rede metroviária de São Paulo transporta mais de três milhões de passageiros diariamente (METRÔ, 2018, p.17), sendo de fundamental importância para a mobilidade da cidade.

Atualmente o sistema funciona entre 4h40min e 24h00min, diariamente, impondo às equipes um curto período para vistoria e manutenção das estruturas de concreto, da via permanente e sistemas elétricos. Este curto período disponível diariamente torna obrigatório o planejamento e a racionalização das intervenções, sempre com o objetivo de minimizá-las e reduzir o seu impacto sobre a operação metroviária.

Nota-se, pelo elevado grau de dependência da cidade do sistema metroviário, que qualquer intervenção de maior proporção ou que esteja fora do planejamento acarretará transtornos e impactos sociais.

Objetiva-se com este trabalho aumentar a previsibilidade da deterioração das estruturas de concreto e evitar intervenções de grande impacto que poderiam paralisar o sistema metroviário, gerando incômodos e insatisfações entre os usuários.

1.4.3 Econômica

O Metrô foi constituído na década de 60 como empresa pública cujo objetivo era a implantação de um novo modal de alta capacidade sobre trilhos, até então inédito no país. Ao longo dos últimos 50 anos os governos municipais, estaduais e federais investiram em sua ampliação e operação, tornando-o elemento fundamental para a mobilidade da cidade.

A implantação dessa infraestrutura, composta pelas estruturas civis, pela via permanente, sistemas elétricos e trens exigem elevados investimentos iniciais e de operação, tornando a atividade de manutenção fundamental do ponto de vista econômico e operacional.

A importância econômica das atividades de manutenção tem tido cada vez mais destaque nos diversos estudos sobre o tema, e nos países desenvolvidos os gastos com reparos tem praticamente se igualado aos gastos com novas construções (Tabela 1).

Segundo MEDEIROS *et al* (2011, p. 774) os conhecimentos sobre durabilidade e vida útil das estruturas de concreto são "fundamentais para contribuir para a economia, sustentabilidade e durabilidade das estruturas sempre lembrando que fazer uma boa engenharia significa manejar bem custos, técnica, recursos humanos e respeito ao meio ambiente".

Tabela 1- Gastos em países desenvolvidos com manutenção (MEDEIROS *et al*, 2011, p. 775)

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%)

Como os custos de manutenção são cobertos, de modo geral, pela passagem paga pelos usuários, uma maior previsibilidade com relação à durabilidade das estruturas do Metrô, identificando antecipadamente pontos de deterioração e norteando medidas preventivas de recuperação podem gerar benefícios econômicos tanto à companhia como aos usuários.

1.4.4 Ecológica

Na construção civil, assim como demais setores produtivos, vem sendo cada vez mais exigido o uso sustentável das matérias primas, tanto nas novas obras como na manutenção e recuperação das existentes. O concreto é o material mais consumido pelo homem e sua produção é responsável por parte significativa das emissões de CO_2 na atmosfera. A produção de cimento no Brasil, por exemplo, produziu aproximadamente 1,4% do CO_2 total emitido no país (JOHN, V.M, 2011, p.1843). Mundialmente essas emissões podem chegar a até 5%.

Torna-se importante a construção de obras mais duráveis e a conservação das existentes, como forma de racionalizar o uso de recursos e matérias primas. A proposta deste projeto de pesquisa é analisar os concretos existentes, de diferentes idades, e identificar expectativas de vida para estas estruturas para diminuir a necessidade de intervenções de maior impacto, gerando resíduos e uso de novos recursos.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico empregado neste trabalho consiste num estudo de caso dividido em três partes denominadas **Parte 1, Parte 2** e **Parte 3.**

A **Parte 1** consistiu na determinação da profundidade da frente de carbonatação experimentalmente por meio de ensaios em campo. Os ensaios em campo foram realizados em dois tipos de estruturas:

- Estruturas de ventilação dos túneis onde ocorre a circulação de trens, denominados poços de ventilação. A função destas

estruturas é garantir a ventilação e renovação do ar permanentemente nos tuneis entre as estações além de servir, em alguns casos, como rota de fuga para funcionários e usuários em caso de incidentes que impeçam a circulação dos trens até a estação mais próxima.

- Estrutura de estação de embarque de passageiros, incompleta e não utilizada no sistema de metroviário.

Na **Parte 2**, foram realizados ensaios em laboratório para a determinação da profundidade de carbonatação em dois corpos de prova, um deles revestido com verniz (acabamento especificado pelo Metrô em caso de concreto aparente) e outro não, submetidos à câmara de carbonatação.

Na **Parte 3**, o modelo matemático para estimativa da profundidade da frente de carbonatação e previsão de vida útil proposto por Tuutti (1982) foi aplicado, tendo como dados de entrada os resultados da Parte 1.

1.6 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos cujo conteúdo é resumidamente apresentado a seguir:

O **Capítulo 1** apresenta ao problema de pesquisa, os objetivos e hipóteses, as justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos adotados.

O **Capítulo 2** apresenta a fundamentação teórica do trabalho e discorre sobre temas relacionados a durabilidade das estruturas de concreto e os instrumentos normativos existentes, o processo de carbonatação, os métodos analíticos para a previsão de vida útil e os métodos de ensaio para a avaliação da profundidade de carbonatação no concreto.

O **Capítulo 3** apresenta o estudo de caso, descrevendo as estruturas selecionadas e a metodologia utilizada para a medição da profundidade da frente de carbonatação e ensaio acelerado em câmara de carbonatação dos corpos de prova previamente preparados.

O **Capítulo 4** apresenta e analisa os resultados obtidos descritos no Capitulo 3.

E por fim o **Capítulo 5** apresenta as considerações finais da pesquisa e recomendações para futuras linhas de estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica do tema em estudo, abordando durabilidade das estruturas de concreto, o processo de carbonatação, os métodos analíticos para previsão de vida útil e a metodologia existente para a avaliação da profundidade de carbonatação no concreto. Como fontes de pesquisa foram utilizadas livros e publicações técnicas, dissertações, teses normas técnicas nacionais e internacionais.

2.1 DURABILIDADE

O termo durabilidade por si só remete a uma ideia de satisfação em relação ao tempo de uso, porém de forma vaga. Quando empregado em relação às estruturas de concreto armado, é necessário que sejam estabelecidos complementos para que seu significado atinja a objetividade necessária à aplicação na comparação, classificação e especificação técnica.

Avaliando, por exemplo, a existência de duas estruturas idênticas, uma instalada em região de campo e outra sujeita a respingo de maré, certamente não suporíamos que ambas apresentassem o mesmo desempenho ao longo do tempo o que denota que a durabilidade não pode estar associada exclusivamente aos materiais empregados. Por outro lado, ainda refletindo em relação a esse exemplo, caso as estruturas tivessem que manter seu desempenho por poucos anos, é possível que a durabilidade fosse considerada satisfatória para as duas situações. O conceito de durabilidade acaba por fim se relacionando a demais conceitos como classe de agressividade e vida útil.

Medeiros et al (2011) apresentam discussão bastante abrangente em relação a estes conceitos. Segundo os autores a durabilidade "*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. Uma mesma estrutura pode ter*

diferentes comportamentos, ou seja, diferentes funções de durabilidade no tempo, segundo suas diversas partes, até dependente da forma de utilizá-la."

Em NBR 15575 (ABNT, 2013) a Vida Útil de Projeto (VUP) é definida como *"...o período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado, a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos nessa norma, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o cumprimento dos procedimentos especificados nos Manuais de Uso, Operação e Manutenção do empreendimento."* A NBR 6118 (NBR, 2014) dedica seu item 6 a considerações sobre vida útil e traz definição similar a citada acima "*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*." No mesmo Item, há ainda destaque para a possibilidade de partes da estrutura apresentarem VUP diferente do restante do todo o que tem como como consequência a eventual necessidade de substituição destas partes.

As classes de agressividade são abordadas de forma subjetiva na NBR 6118 (ABNT, 2014) conforme Tabela 2. Em função basicamente desta classificação, da existência ou não de protensão e do tipo de elemento estrutural, são definidas propriedades do concreto e cobrimento (Tabela 3 e Tabela 4). Por esta metodologia a norma introduziu de forma simples e prática mecanismo para atendimento dos principais requisitos da norma relacionados à durabilidade contudo há que se reconhecer que não há clareza em relação à vida útil à qual se relacionam estes requisitos.

Tabela 2 - Classe de agressividade ambiental CAA (ABNT NBR 6118, 2014).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana [a, b]	Pequeno
III	Forte	Marinha [a] Industrial [a, b]	Grande
IV	Muito forte	Industrial [a, c] Respingos de maré	Elevado

[a] Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

[b] Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

[c] Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Tabela 3 - Correspondência entre classe de agressividade e a qualidade do concreto (ABNT NBR 6118, 2014).

Concreto [a]	Tipo [b, c]	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

[a] O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

[b] CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

[c] CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Tabela 4 - Correspondência entre classe de agressividade e cobrimento nominal (ABNT NBR 6118, 2014).

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV [c]
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje [b]	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo [d]	30		40	50
Concreto protendido [a]	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

[a] Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

[b] Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

[c] Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

[d] No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

O Eurocode 2 (EN. 1992-1-1, 2004) traz abordagem prescritiva semelhante à da ABNT NBR 6118, 2014, porém mais detalhada. Na Tabela 5, observa-se a diferenciação do agente/ ambiente agressivo.

Tabela 5 - Definição de classe relacionada a condições de exposição ambiental conforme EN 1992 1-1 (2004).

Class designation	Description of the environment	Informative examples where exposure classes may occur
1 No risk of corrosion or attack		
X0	For concrete without reinforcement or embedded metal: all exposures except where there is freeze/thaw, abrasion or chemical attack For concrete with reinforcement or embedded metal: very dry	Concrete inside buildings with very low air humidity
2 Corrosion induced by carbonation		
XC1	Dry or permanently wet	Concrete inside buildings with low air humidity Concrete permanently submerged in water
XC2	Wet, rarely dry	Concrete surfaces subject to long-term water contact Many foundations
XC3	Moderate humidity	Concrete inside buildings with moderate or high air humidity External concrete sheltered from rain
XC4	Cyclic wet and dry	Concrete surfaces subject to water contact, not within exposure class XC2
3 Corrosion induced by chlorides		
XD1	Moderate humidity	Concrete surfaces exposed to airborne chlorides
XD2	Wet, rarely dry	Swimming pools Concrete components exposed to industrial waters containing chlorides
XD3	Cyclic wet and dry	Parts of bridges exposed to spray containing chlorides Pavements Car park slabs
4 Corrosion induced by chlorides from sea water		
XS1	Exposed to airborne salt but not in direct contact with sea water	Structures near to or on the coast
XS2	Permanently submerged	Parts of marine structures
XS3	Tidal, splash and spray zones	Parts of marine structures
5. Freeze/Thaw Attack		
XF1	Moderate water saturation, without de-icing agent	Vertical concrete surfaces exposed to rain and freezing
XF2	Moderate water saturation, with de-icing agent	Vertical concrete surfaces of road structures exposed to freezing and airborne de-icing agents
XF3	High water saturation, without de-icing agents	Horizontal concrete surfaces exposed to rain and freezing
XF4	High water saturation with de-icing agents or sea water	Road and bridge decks exposed to de-icing agents Concrete surfaces exposed to direct spray containing de-icing agents and freezing Splash zone of marine structures exposed to freezing
6. Chemical attack		
XA1	Slightly aggressive chemical environment according to EN 206-1, Table 2	Natural soils and ground water
XA2	Moderately aggressive chemical environment according to EN 206-1, Table 2	Natural soils and ground water
XA3	Highly aggressive chemical environment according to EN 206-1, Table 2	Natural soils and ground water

A definição de classe estrutural está relacionada à vida útil de projeto. Conforme EN 1992 1-1 (2004), a classe estrutural correspondente à vida útil de 50 anos é a S4 que deve ser modificada conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Definição de classe estrutural conforme EN 1992 1-1 (2004).

Structural Class							
Criterion	Exposure Class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
Design Working Life of 100 years	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2	increase class by 2
Strength Class [1) 2)]	≥ C30/37 reduce class by 1	≥ C30/37 reduce class by 1	≥ C35/45 reduce class by 1	≥ C40/50 reduce class by 1	≥ C40/50 reduce class by 1	≥ C40/50 reduce class by 1	≥ C45/55 reduce class by 1
Member with slab geometry (position of reinforcement not affected by construction process)	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1
Special Quality Control of the concrete production ensured	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1	reduce class by 1

O cobrimento mínimo é definido pelo cruzamento entre a classes estrutural e a condição de exposição ambiental conforme Tabela 7, para concreto armado e Tabela 8, para concreto protendido.

Tabela 7 – Cobrimento mínimo para atendimento a requisitos de durabilidade para concreto armado conforme EN 1992 1-1 (2004).

Environmental Requirement for $c_{min,dur}$ (mm)							
Structural Class	Exposure Class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Tabela 8 – Cobrimento mínimo para atendimento a requisitos de durabilidade para concreto protendido conforme EN 1992 1-1 (2004).

Environmental Requirement for $c_{min,dur}$ (mm)							
Structural Class	Exposure Class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

2.2 PROCESSO DE CARBONATAÇÃO E SUA AVALIAÇÃO

O concreto armado, como solução estrutural, é o método construtivo mais empregado no Brasil e em muitos países do mundo. Fatores como custo dos materiais envolvidos em sua produção, a abundância da mão de obra qualificada, o conhecimento adquirido das etapas de projeto e execução e as técnicas e custos de manutenção conhecidos o tornaram, ao longo de mais de um século, o mais utilizado e pesquisado em nosso país.

A produção do concreto estrutural envolve diversas variáveis para sua produção e execução, tais como os materiais constituintes e sua forma de aplicação, as diversas etapas envolvidas na sua execução (forma, cimbramento, armação, concretagem, desforma, acabamento, etc.), o microclima e a agressividade do ambiente em que estão inseridas. Foi a observação e o estudo mais aprofundado destas variáveis que permitiu o conhecimento dos mecanismos de envelhecimento e deterioração do concreto, quando aplicado em diversos tipos de ambientes e sobre variadas condições de carregamento.

Estes mecanismos podem ser entendidos como a identificação do processo que promove a deterioração do material ou da estrutura, seja ele químico, físico, biológico ou mecânico (BOLINA *et al*, 2019, p.40). É essencialmente a explicação científica de como a deterioração se desenvolveu, ou seja, a forma de sua evolução. Seu entendimento é vital para a prevenção de manifestações patológicas nas estruturas de concreto.

Classifica-se a deterioração por mecanismo químico aquela que promove alteração nos compostos do concreto, quando em contato com agente agressivo (interno ou externo). Recebe essa classificação a deterioração por carbonatação do concreto, pela presença de íons cloreto, ataques por sulfatos e reações expansivas, como a reação álcali-agregado (RAA).

A deterioração por mecanismo físico ocorre quando são produzidos esforços internos à estrutura, tais como expansão e retração térmica ou ainda a ação de gelo-degelo, gerando fissuras.

São classificados como mecanismos biológicos de deterioração das estruturas de concreto aqueles originários pela presença de fungos, bactérias ou musgos que atacam a pasta do cimento, o que pode ocasionar em certos casos, a deterioração superficial do concreto ou até o surgimento de fissuras.

Já a deterioração através de mecanismos mecânicos ocorre quando ocorre carregamento excessivo e/ou deficiência no dimensionamento da peça, gerando esforços de tração, compressão, esmagamento, entre outros.

O processo de carbonatação pode ser considerado uma deterioração por processo químico onde um agente agressivo externo atua sobre o concreto, reduzindo sua capacidade protetora sobre a armadura, o que eventualmente leva à ocorrência de corrosão nas barras.

Consiste na penetração do dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera através dos poros e fissuras existentes na estrutura do concreto e sua reação principalmente com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) existente na água do concreto, formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (SOUZA & RIPPER, 1998, p.74). Pode ser definida ainda como a transformação de "íons alcalinos como cátions de sódio, potássio e, sobretudo, de cálcio, em sais de carbonato desses elementos, pela ação ácida do dióxido de carbono presente no ar" (CASCUDO & CARASEK, 2011, p.849). A reação de carbonatação é apresentada na Equação 1.

$$Ca(OH_2) + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{(Equação 1)}$$

Segundo Bolina (2019), a carbonatação também pode ocorrer pela dissolução do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e das fases aluminato do concreto. Porém a carbonatação mais relevante é a do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), principalmente por ser o mais solúvel entre os produtos de hidratação do cimento e que reage mais rapidamente ao contato com o CO_2.

A carbonatação é um processo lento, que avança da superfície exterior do concreto para seu interior. O avanço do CO_2 para o interior do concreto se dá pelo mecanismo de difusão (transporte de um meio de maior concentração pra outro de menor concentração) através dos poros e de sua interconecções.

Concretos com grande interconectividade entre seus poros são mais suscetíveis ao processo de carbonatação. Segundo Cascudo & Carasek (2011) a situação ideal para o avanço da frente de carbonatação ocorre quando os poros estão parcialmente preenchidos com água (Figura 2), situação normalmente encontrada na superfície do concreto.

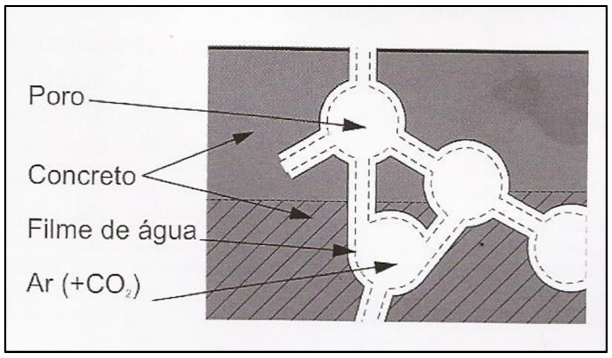


Figura 2 - Processo de carbonatação, com poros parcialmente preenchidos. (BAKKER, 1988 *apud* CASCUDO & CARASEK, 2011, p.855).

Atuando na superfície do concreto ele modifica características químicas e mecânicas, tais como resistência mecânica, porosidade, permeabilidade e durabilidade (SILVA, 2002, p.26).

Em função do transporte por mecanismo de difusão a velocidade e profundidade dependem de diversos fatores, como pH do concreto, a porosidade e as condições dentro dos poros, fatores ligados á composição do concreto utilizado tais como consumo de cimento e adições, fator água/cimento (a/c) e fatores ambientais, como teor de CO_2 no meio ambiente, umidade relativa do ar e temperatura.

A porosidade do concreto está diretamente ligada ao fator água/cimento (a/c) da mistura: quanto maior a relação a/c, maior a densidade de poros e maior será a velocidade de carbonatação. Já um maior teor de cimento na dosagem diminui a velocidade da carbonatação, pois se tem uma quantidade maior de $Ca(OH)_2$ que atua como reserva alcalina. Porem maiores teores de cimento induzem a retração e fissuração, facilitando a entrada de CO_2. Ressalta-se assim

que o estudo de dosagem é fundamental para a proteção da estrutura de concreto armado contra o ingresso de agentes agressivos.

O aumento do teor de CO_2 no ambiente torna o fenômeno mais agressivo. A Tabela 9mostra diferentes níveis de concentração de CO_2, conforme o ambiente em que se localizam. É possível observar a grande variação entre os diversos tipos de ambiente.

Tabela 9 - Concentração de CO_2 no ar em relação a alguns tipos de ambientes (Neville, 1997 *apud* CASCUDO & CARASEK, 2011, p. 856).

Concentração de CO_2 no ar (em Volume)	**Tipo de Ambiente**
0,03%	Ambiente rural
0,1%	Ambiente de laboratório (não ventilado)
0,3%	Ambiente urbano
1,0%	Ambiente urbano-industrial

A umidade relativa do ar exerce maior influência sobre o avanço da frente de carbonatação, especialmente na faixa de 50% a 70%, conforme indicado na Figura 3. A temperatura também exerce influência sobre o processo, pois sua atuação pode aumentar a velocidade das reações químicas à medida que as temperaturas se elevam (CASCUDO & CARASEK, 2011, p.857).

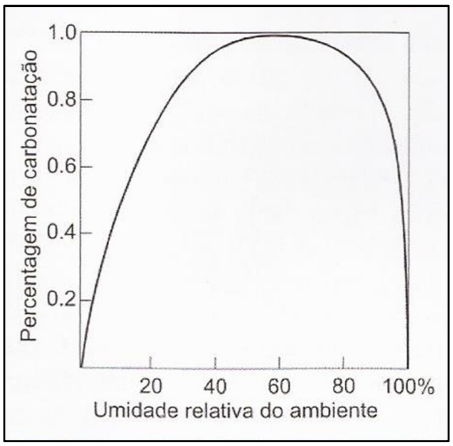


Figura 3 - Porcentagem de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente (VENUAT, 1977 *apud* CASCUDO & CARASEK, 2011, p.857).

Com base no exposto acima nota-se que determinadas regiões das estruturas podem estar menos ou mais expostas ao processo de carbonatação, como por exemplo, garagens em subsolos, viadutos sobre vias de grande movimento e estruturas de tuneis metroviários.

Quando as condições ideais para o surgimento do processo de carbonatação estão estabelecidas o fenômeno se inicia, formando a chamada frente de carbonatação, com zonas onde o pH fica abaixo de 9 (região carbonatada) e regiões com pH acima de 12 (não carbonatada), conforme é possível observar na imagem Figura 4.

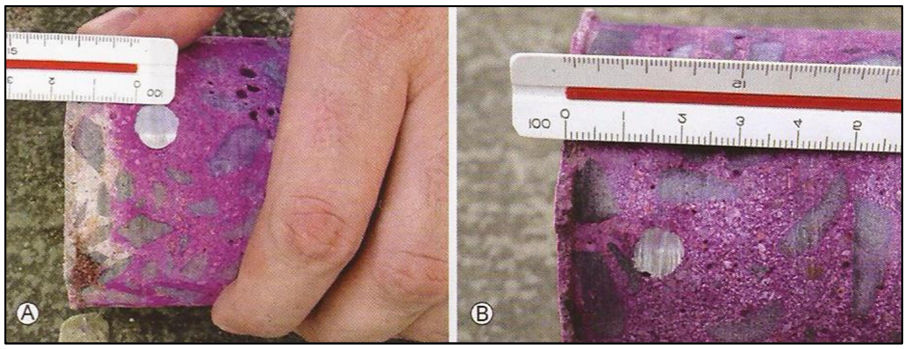


Figura 4 - Testemunho carbonatado (A) e não carbonatado (B)
(BOLINA *et al*, 2019, p.103).

Em condições naturais de exposição ao CO_2, o processo de carbonatação pode ser considerado lento, de modo que são necessários anos ou décadas para que possam ser detectados seus efeitos nas estruturas. Além disso, o fenômeno tende a diminuir de velocidade ao longo do tempo devido a hidratação do cimento e a colmatação gradativa dos poros, impedindo a entrada de CO_2.

O avanço da frente de carbonatação através do concreto, reduzindo a alcalinidade do meio, compromete a camada passivadora que o concreto são oferece sobre as armaduras, tornando-as suscetíveis ao processo de corrosão, especialmente devido à umidade que permanece no interior do concreto e seca mais lentamente. A partir do momento que a armadura perde a película de passivação e inicia-se o processo corrosivo compromete-se a durabilidade da estrutura.

A determinação visual se uma estrutura de concreto está ou não carbonatada é de difícil verificação. Essa avaliação é feita através de um método colorimétrico, pela da aspersão de um indicador de pH, que fornece diretamente sobre a amostra ou região ensaiada a profundidade carbonatada. Estes indicadores são borrifados sobre a superfície do concreto e quando em contato com regiões com pH acima de 9 adquirem uma coloração característica. As regiões já carbonatadas não tem alteração de cor. Segundo Cascudo & Carasek (2011) utiliza-se na maioria das vezes uma solução a base de fenolftaleína que adquire coloração vermelha carmim com pHs iguais ou superiores numa faixa entre 8,0 e 9,8. Já a timolftaleína apresenta coloração violeta ou azulada para pHs na ordem de 9,3 a 10,5 e o amarelo de alizarina apresenta coloração amarela para pHs iguais ou superiores a faixa de 10,1 e 12,0 (ver Figura 5).

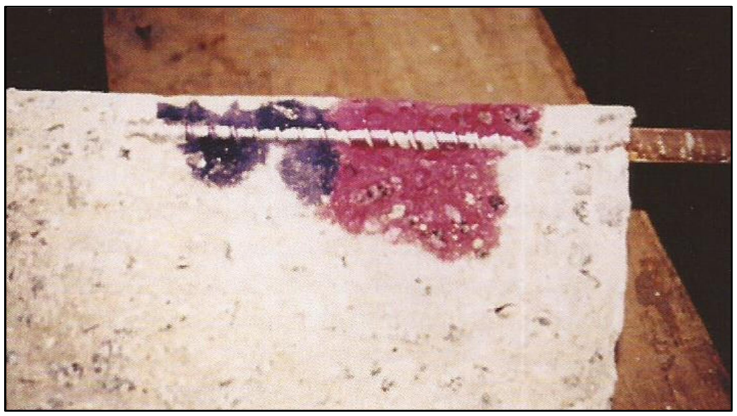


Figura 5 - Aplicação de indicador colorimétrico em amostra: timolftaleína em azul e fenolftaleína em vermelho carmim (Cascudo, 1997 *apud* CASCUDO & CARASEK, 2011, p. 873).

Para a execução deste ensaio devem ser tomadas algumas precauções, tais com evitar o corte do concreto com disco de corte, evitar umedecimento da região de ensaio e retirar o excesso de poeira da região avaliada, para evitar dificuldades de visualização da região amostrada e falseamento de resultados. Antes da aplicação do indicador colorimétrico é recomendada a limpeza da região fraturada do concreto com pincel ou jato de ar comprimido. A aspersão do

indicador deve ser feita preferencialmente em até um minuto após a fratura (CASCUDO & CARASEK, 2011, p.873).

Existem outras técnicas mais sofisticadas para a determinação da frente de carbonatação, tais como a termogravimetria e a difração de raios x, indicando sua profundidade, os carbonatos formados e a sua origem e em geral são empregados em pesquisas científicas que buscam aumentar o entendimento do fenômeno da carbonatação (CASCUDO & CARASEK, 2011, p.875).

Em virtude disso, quando necessária a avaliação da susceptibilidade de um determinado material ao efeito da carbonatação, podem ser realizados ensaios com uso de Câmaras de Carbonatação Acelerada. Não há documentos normativos que disciplinem a execução destes ensaios que consistem, de forma geral, em se submeter corpos de prova ao confinamento em câmaras com saturação de CO_2 superior à do ambiente, e geralmente com umidade e temperatura controlados, mantidos em níveis que favoreçam à penetração do CO_2. Os ensaios apresentados no Item 3.2deste documento foram realizados no Laboratório de Cimento da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Neste laboratório, especificamente, o procedimento padrão consiste em manter corpos de provas em câmara com saturação de CO_2 em 5% e temperatura de 23º pelo período de 8 semanas. Semanalmente os corpos de prova são retirados da câmara, fatiados com uso de retífica e submetidos a teste de fenolftaleína.

Como forma de prevenir o processo de carbonatação podem ser utilizados produtos que criem películas superficiais, tais como tintas e vernizes, reduzindo a penetração do CO_2 na estrutura (Figura 6). Segundo Araújo e Panossian (2008) o verniz de poliuretano antipichação utilizado para o tratamento de obras em concreto aparente possui características que o tornam uma barreira de proteção, retardando o avanço do processo de carbonatação. O envelhecimento do verniz provoca a perda desta capacidade, tornando necessária sua manutenção e reaplicação.



Figura 6 - Pilar com aplicação de verniz antipichação sobre a superfície do concreto (fonte: Autor, 2013).

Pode-se utilizar ainda a aplicação de argamassas modificadas a base de cimento ou aumentar o cobrimento existente da estrutura, com a aplicação de camada adicional de concreto.

Para estruturas onde a frente de carbonatação já tenha atingido as armaduras as técnicas acima citadas tornam-se sem efeito. Dentre as técnicas existentes para a recuperação ou restauração da passividade do concreto está a realcalinização do concreto carbonatado. Segundo Araújo (2009), de modo geral existem dois mecanismos de restabelecimento da alcalinidade do concreto: a realcalinização química ou passiva e a realcalinização eletroquímica.

O método químico ou passivo consiste na difusão e absorção capilar de solução alcalina aplicada sobre a superfície do concreto carbonatado. Trata-se de um processo bastante lento.

A realcalinização eletroquímica ocorre através do uso de corrente elétrica entre um ânodo fixado externamente á estrutura (tela) e um cátodo interno (a armadura da estrutura) para que os álcalis da solução alcalina aplicada na superfície a ser tratada migrem para o concreto, restaurando o pH do concreto e a proteção das armaduras. É um sistema mais rápido que o químico, sendo aplicado em geral por períodos de três dias a duas semanas.

Independentemente do método de recuperação devem ser tomadas medidas para a proteção do concreto, evitando a reentrada do CO_2 e a volta do processo de carbonatação.

2.3 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA PREVISÃO DE VIDA ÚTIL

Atualmente diversos há diversos modelos matemáticos aplicáveis à estimativa da vida útil das estruturas de concreto armado. Possan (2010) apresenta um levantamento consistente dos principais deles destacando suas variáveis e limitações. Um dos mais antigos, simples e difundidos, é o proposto por Tuutti, (1982) que é expresso pela Equação 2.

$$e_c = k.\sqrt{t} \qquad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

e_c - espessura carbonatada em milímetros;

k - coeficiente dependente da difusividade efetiva do CO_2 através do concreto (coeficiente de carbonatação);

t – tempo em anos ou meses.

Este modelo matemático apresenta como limitação o fato de somente poder ser utilizado para estimativa da vida útil de estruturas existentes, ou seja, não serve como ferramenta de projeto de novas estruturas. A despeito desta limitação e da sua simplicidade tem boa precisão, conforme destaca Possan (2010, pg. 218).

Este trabalho está fundamentado principalmente na formulação proposta por Tuutti (1982), em parte pelo fato de estarmos propondo a avaliação de estruturas existentes e também pela dificuldade de obtermos as informações necessárias para a aplicação da maior parte dos outros modelos existentes, no caso das estruturas mais antigas. Sendo assim, a formulação será inicialmente utilizada para a determinação dos valores de k para as estruturas estudadas (a variável tempo (t), idade das estruturas, é um dado que consta dos arquivos do Metrô e a espessura carbonatada (e_c) será medida em ensaios experimentais em campo).

Num segundo momento, a formulação será utilizada para estimar o tempo em que a frente de carbonatação atingirá a armadura (o k já terá sido determinado conforme descrito anteriormente e se considerará a espessura carbonatada (e_c) igual ao cobrimento especificado em projeto).

Possan (2010) apresenta formulação obtida por meio de modelagem empírica combinada a modelos físico-químicos que regem o fenômeno da cabonatação. A vantagem apontada em relação à esta formulação (Equação 3), apesar da sua aparente complexidade, é a facilidade de obtenção dos dados de entrada que dependem basicamente do tipo de cimento, resistência do concreto, teor de adição, umidade do ambiente, teor de CO2 e condição de exposição. As constantes k_c, k_{fc}, k_{ad}, k_{UR}, k_{CO2} e k_{ce} são obtidas nas Tabela 10 e Tabela 11.

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

Onde:

y = profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;
f_c = resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;
k_c = fator variável referente ao tipo de cimento empregado;
k_{fc} = fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado;
t = idade do concreto, em anos;
ad = teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;
k_{ad} = fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do tipo de cimento utilizado;
UR = umidade relativa média, em %*0,01;
k_{ur} = fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado;
CO_2 = teor de CO_2 da atmosfera, em %.
k_{co2} = fator variável referente ao teor de CO_2 do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado;
k_{ce} = fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura.

Tabela 10 - Coeficientes do modelo de Possan (2010) em função das características do concreto e condições ambientais.

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	kco_2	k_{UR}
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300

Tabela 11 - Coeficientes do modelo de Possan (2010) em função das características do concreto e condições de exposição.

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	k_{ce}
Ambiente interno Protegido da chuva	1,30
Ambiente externo Protegido da chuva	1,00
Ambiente externo Desprotegido da chuva	0,65

3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consistiu em ensaios de campo e ensaios laboratoriais descritos a seguir.

3.1 ENSAIOS DE CAMPO

Os ensaios de campo foram realizados com a finalidade de determinar a espessura da frente de carbonatação em estruturas do Metrô com diferentes idades. Definiram-se três unidades construtivas a serem ensaiadas, pertencentes às três linhas diferentes do Metrô (linhas 1-Azul, 2-Verde e 3-Vermelha): duas ventilações e uma estação. Os ensaios foram denominados Ensaio de Campo 1, Ensaio de Campo 2 e Ensaio de Campo 3. A definição das regiões dentro das estações/ventilações em que foram realizados os ensaios ficou a cargo da área de manutenção do Metrô em função da facilidade de acesso e não interferência com a operação, mas cuja agressividade do ambiente fosse representativa do restante da estrutura.

Os procedimentos de ensaio empregados em cada uma delas consistiram em:

I. Definição da região de ensaio na estrutura, preferencialmente em paredes e alturas diferentes, de acordo com as condições de acessibilidade locais;

II. Determinação da posição das armaduras e espessura aproximada do cobrimento na região de ensaio através da utilização de detector de materiais (pacômetro);

III. Marcação das barras detectadas na parede com uso de giz. Buscou-se locar os pontos de ensaio na projeção destas barras;

IV. Remoção superficial do concreto nos pontos definidos na etapa anterior ultrapassando a profundidade do cobrimento de projeto, preferencialmente expondo a armadura local. No Ensaio de Campo 1, esse processo foi realizado manualmente com uso de ponteira e marreta devido à ausência de ponto de energia. Isso se mostrou pouco produtivo e fisicamente desgastante, de modo que

para a escolha das estruturas para demais ensaios adicionou-se o critério de disponibilidade de energia elétrica. Nos Ensaios de Campo 2 e 3, utilizou-se martelete de impacto para esta operação;

V. Imediatamente após a remoção de concreto atingir a profundidade desejada, a superfície de corte era limpa utilizando pincel e aspergia-se solução de fenolftaleína (1g de fenolftaleína, 50 ml de álcool 92%, 50 ml de água destilada) sobre a região, formando um filme contínuo;

VI. Após dez minutos da aplicação realizava-se medição da profundidade da frente de carbonatação com paquímetro e régua metálica para fixação de referência.

3.1.1 Ensaio de campo 1

O ensaio de campo 1 foi realizado em uma estrutura de ventilação da Linha 1 - Azul. Na Figura 7 é apresentada uma vista geral das estruturas onde foram realizados os ensaios.



Figura 7 - Torres da estrutura de ventilação

Segundo os dados de projetos localizados, as estruturas foram projetadas e construídas entre os anos de 1973 e 1974. As especificações do projeto indicam um concreto com fck de 15 MPa e cobrimento de 2 cm.

Foram ensaiados quatro pontos nesta estrutura, em dois níveis diferentes, conforme croqui abaixo (Figura 8, Figura 9 e Figura 10). Os ensaios foram feitos em duas etapas: uma realizada em 07/11/2019 e outra em 13/08/2020.

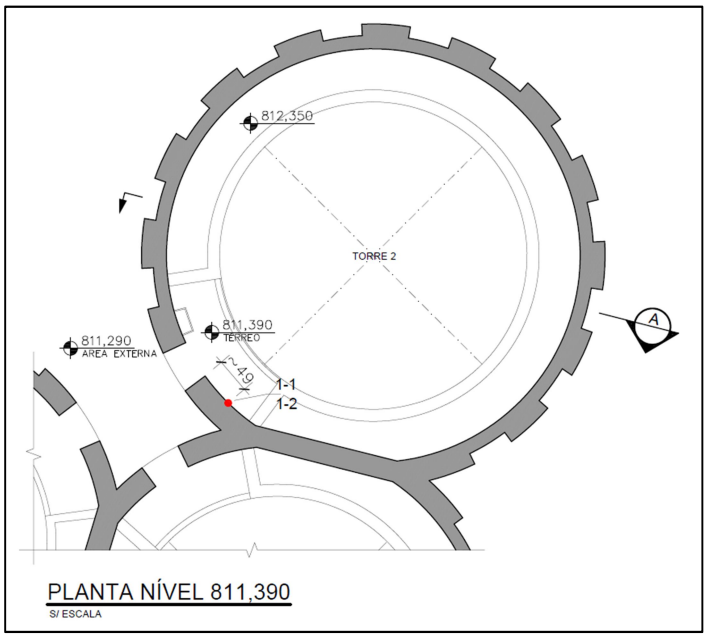


Figura 8 – Planta da estrutura de ventilação da Linha 1 – Azul (térreo)

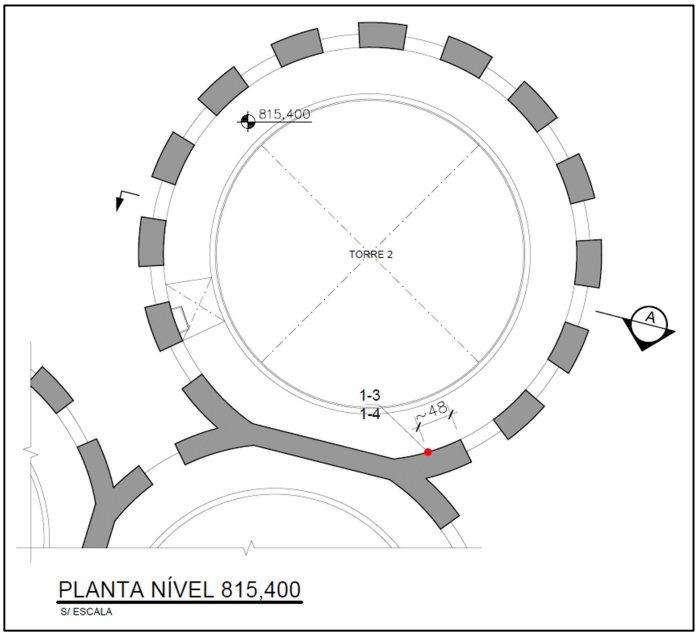


Figura 9 – Planta da estrutura de ventilação da Linha 1 – Azul (patamar superior)

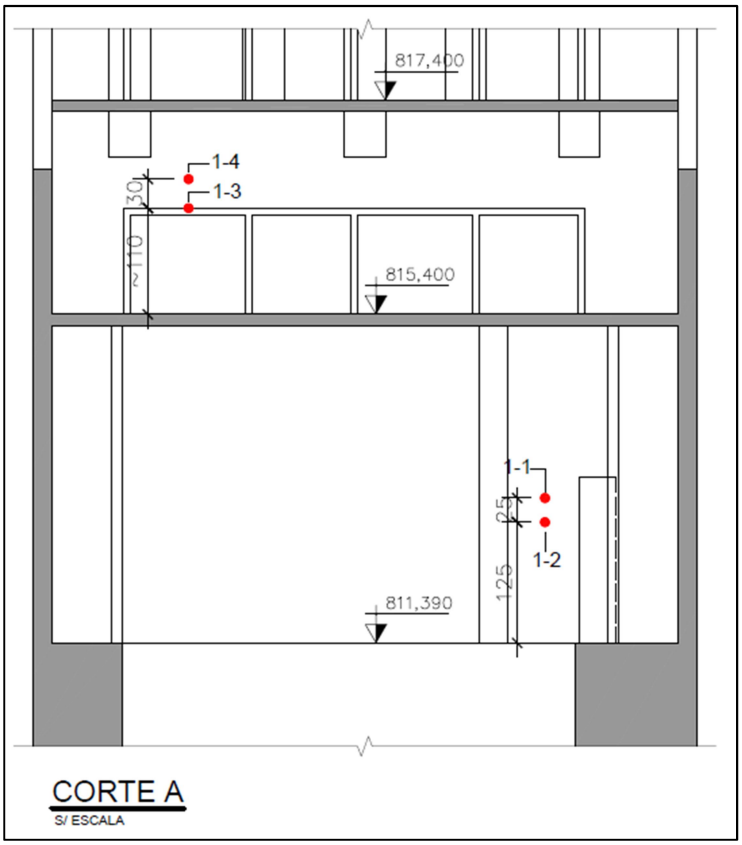


Figura 10 – Corte B, com destaque aos pontos ensaiados nos dois níveis

A primeira etapa de ensaios, que contemplou os pontos 1-1 e 1-2, foram realizados no nível térreo, junto à porta de acesso da torre de ventilação. Foi escolhido um local acessível e selecionada uma parede para a realização do ensaio. Realizou-se a limpeza da superfície e a localização e marcação das armaduras, através do pacômetro Bosch D-tect 150 (Figura 11).



Figura 11 - Detecção e marcação das armaduras na região do ensaio

Após a determinação da posição das armaduras e sua provável profundidade foi iniciado o corte do concreto, de forma manual até se atingir a profundidade desejada (Figura 12).



Figura 12 - Início do processo de corte do concreto

Foram ensaiados dois pontos (1-1 e 1-2) na parede, distantes 25 cm, onde haviam sido detectadas armaduras, porém não foi possível localiza-las e aferir o real cobrimento utilizado (Figura 13).



Figura 13 - Pontos 1-1 e 1-2 onde foi retirado o concreto e realizados os ensaios

A Figura 14 ilustra a dimensão do ensaio 1-1 com aproximadamente 12 cm.



Figura 14 - Detalhe das dimensões do corte, com o indicado de pH já aplicado

Por fim foram efetuadas as medidas da profundidade da frente de carbonatação, com auxílio de paquímetro e régua de aço (Figura 15).



Figura 15 - Medição da profundidade da frente de carbonatação

A segunda etapa de ensaios contemplou os pontos 1-3 e 1-4. O local escolhido foi na parede interna do poço, na parte superior da estrutura da torre de ventilação.

Foi feita a limpeza da região do ensaio e a marcação da armadura através do pacômetro (Figura 16).



Figura 16 - Região de ensaio limpa e com posição das armaduras locadas

Após o corte manual do concreto se procedeu à limpeza da abertura com pincel (Figura 17), para retirada de materiais contaminantes. Não foi possível localizar a armadura, para aferição do cobrimento real no trecho.



Figura 17 - Limpeza do corte com pincel

Após a limpeza foi aplicada a solução de fenolftaleína na região do ponto 1-3 (Figura 18) e feita a medição da profundidade de carbonatação na estrutura.



Figura 18 - Ponto 1-3 com solução de fenolftaleína aplicada, aguardando para efetuar medição

Repetiu-se o procedimento para o ponto 1-4, localizado aproximadamente a 1 m acima do anterior (Figura 19).



Figura 19 - Disposição dos pontos de ensaio 1-3 e 1-4

Ao final do processo foi realizada a medição da profundidade da frente de carbonatação com paquímetro e régua metálica (Figura 20). Novamente não foi localizada a armadura para aferição do cobrimento real.



Figura 20 - Medição do ponto 1-4 através de paquímetro e régua metálica

3.1.2 Ensaio de campo 2

O ensaio de campo 2 foi realizado no poço de ventilação da Linha 2-Verde, entre as estações Ana Rosa e Chácara Klabin . A Figura 21 apresenta uma vista geral da estrutura do acesso, ao nível do terreno.



Figura 21 - Vista geral da estrutura da Linha 2-Verde

Os dados de projeto indicam que a estrutura foi construída no ano de 2005, com especificações para um concreto de fck 30MPa e cobrimento de 3 cm.

Foram ensaiados cinco pontos nesta estrutura, em três níveis diferentes, conforme indicado no croqui abaixo (Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25). Os ensaios foram realizados no dia 21/11/2020.

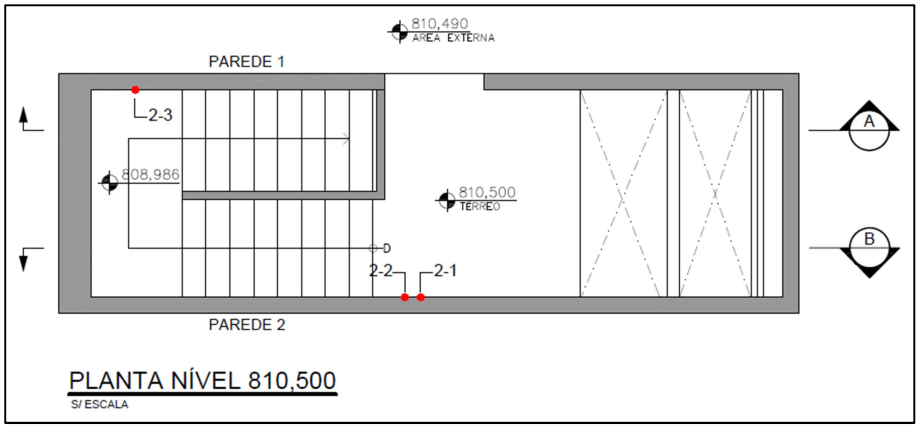


Figura 22 – Planta da estrutura de ventilação da Linha 2-Verde (térreo)

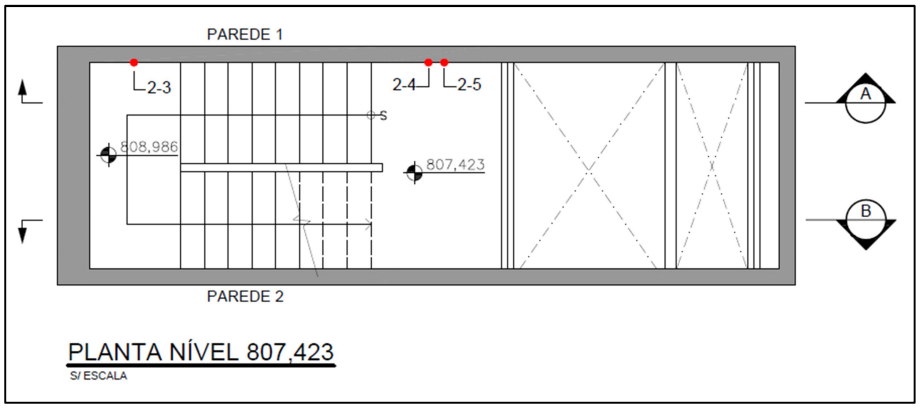


Figura 23 – Planta da estrutura de ventilação da Linha 2-Verde (patamar inferior)

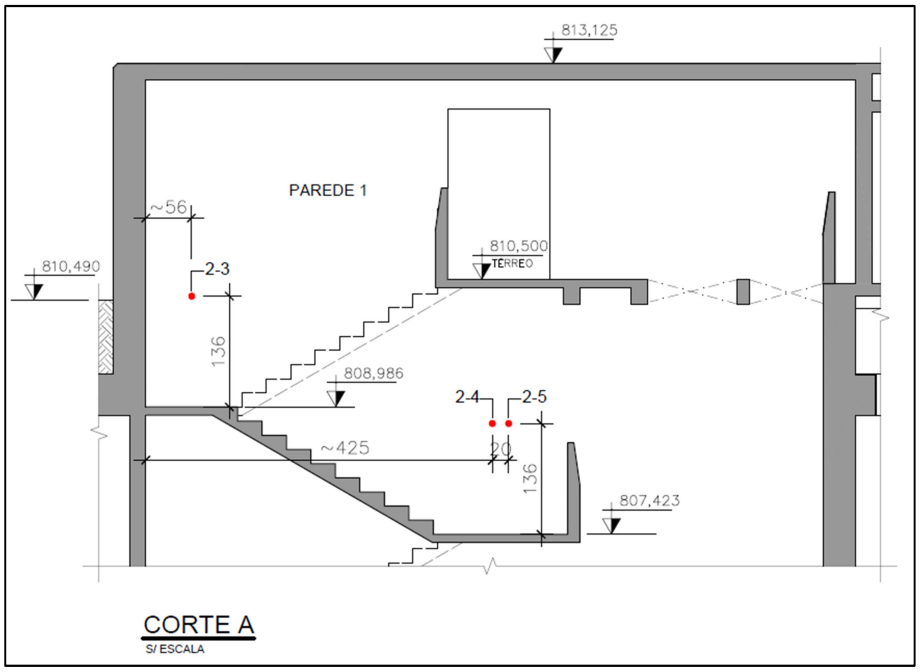


Figura 24 – Corte A com destaque para os pontos ensaiados 2-3, 2-4 e 2-5

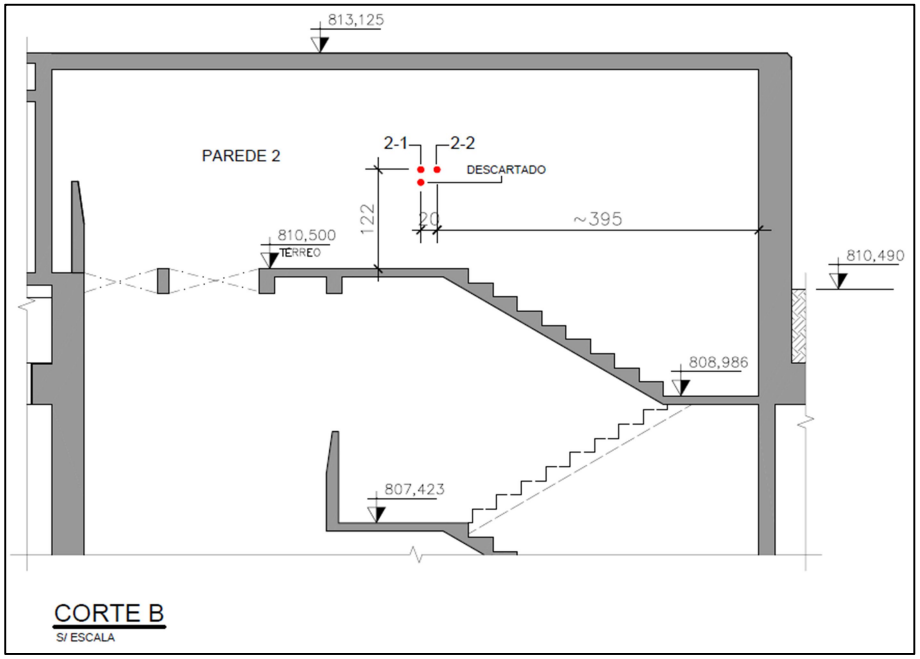


Figura 25 – Corte B com destaque para os pontos ensaiados (2-1 e 2-2)

Os pontos 1-1 e 1-2 foram realizados no nível térreo da estrutura, junto à porta de acesso, em local acessível e ao alcance do ponto de energia elétrica. Após a seleção da parede realizou-se a limpeza da superfície e a marcação das armaduras através do detector de materiais marca Bosch D-tect 150 (Figura 26)



Figura 26 - Detecção e marcação das armaduras através de pacômetro

Com a determinação do posicionamento das armaduras foi feita marcação a giz na parede para a locação dos pontos de ensaio (Figura 27)



Figura 27 - Marcação da posição das armaduras

Iniciou-se o corte do concreto no ponto 2-1 através de martelete de impacto na região onde foi detectada armadura, a uma altura aproximada de 1,2m acima do nível do piso (Figura 28).



Figura 28 - Início do corte do concreto no ponto 2-1

Nesta parede foram efetuados abertura de três pontos para ensaio, sendo que um foi descartado em função de fissura pré-existente que contaminou a região, provocando leituras pouco confiáveis.

A Figura 29 ilustra o ensaio 2-1 com aproximadamente 5 cm de diâmetro, semelhante ao ensaio 2-2.



Figura 29 - Ponto 2-1 com solução de fenolftaleína já aplicada

Para efeito de medição da profundidade de carbonatação foram utilizados os pontos 2-1 e 2-2 (Figura 30)



Figura 30 - Parede ensaiada com os pontos 2-1 e 2-2

Na etapa seguinte foi realizada em parede localizada do lado oposto aos dois primeiros ensaios, em patamar inferior da escada de acesso, aproximadamente 1,36 m acima do piso do patamar. Foram executados os mesmos procedimentos para limpeza da superfície, detecção das barras e sua marcação para orientação do corte 2-3 (Figura 31).

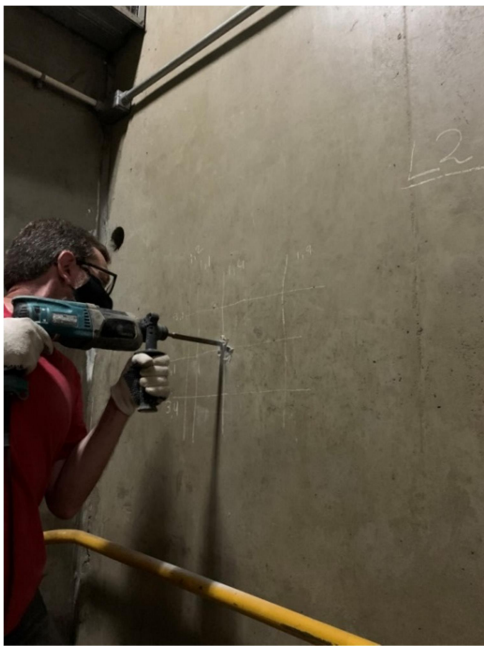


Figura 31 - Remoção do concreto para o ensaio 2-3

Após a remoção do concreto (profundidade de 23 mm) e limpeza superficial com pincel foi aspergida a solução de fenolftaleína sobre a região, obtendo-se que toda a profundidade removida se encontrava carbonatada (Figura 32)



Figura 32 - Ensaio 2-3 totalmente carbonatado

Na sequência foi ensaiada a parede do patamar inferior, a uma altura de 1,36 m acima do piso. Novamente foi feita a detecção da armadura pelo pacômetro, com a marcação das barras da armadura e os pontos para remoção do concreto (Figura 33).

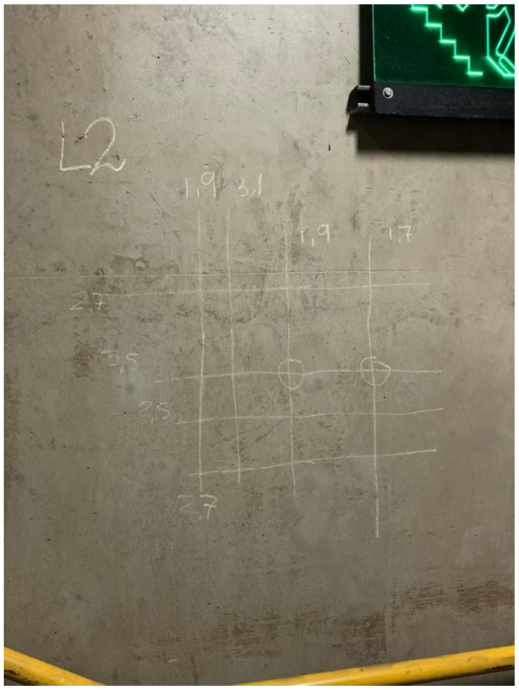


Figura 33 - Marcação para os ensaios 2-4 e 2-5

Foi feita a remoção do concreto nos pontos 2-4 e 2-5, com aplicação da solução de fenolftaleína e medição da profundidade de carbonatação. Na Figura 34, é apresentada a disposição dos pontos de ensaio, com diâmetro entre 5 a 7 cm.

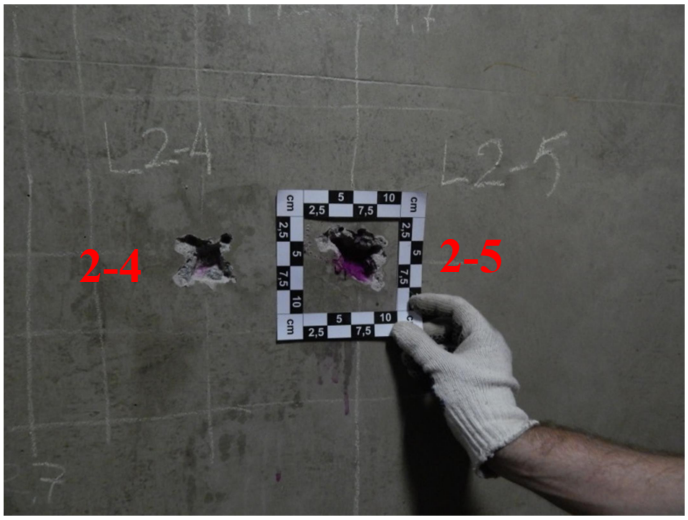


Figura 34 - Disposição dos ensaios 2-4 e 2-5

3.1.3 Ensaio de campo 3

O ensaio de campo 3 foi realizado em estação enterrada da Linha 3-Vermelha. A estrutura inacabada desta estação seria utilizada como integração para a linha Sudoeste-Sudeste, cujo traçado foi posteriormente modificado.

A Figura 35 mostra uma vista geral da estrutura incompleta da estação enterrada.



Figura 35 - Vista geral da estação enterrada

Segundo a pesquisa realizada junto aos projetos originais, as estruturas foram projetadas e construídas entre 1979 e 1980, com especificações para concreto de 15 MPa e cobrimento de 2 cm.

Foram ensaiados quatro pontos na estrutura, conforme croqui abaixo (Figura 36, Figura 37 e Figura 38). Os ensaios foram feitos no dia 21/11/2020.

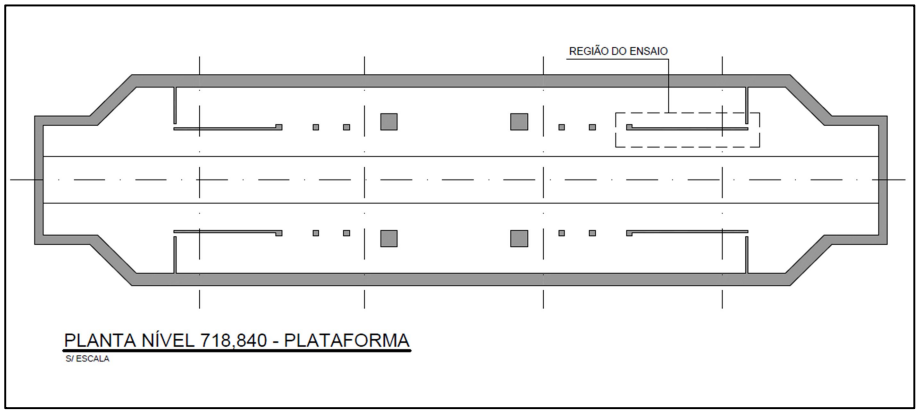


Figura 36 – Planta geral da estação da Linha 3-Vermelha no nível da plataforma

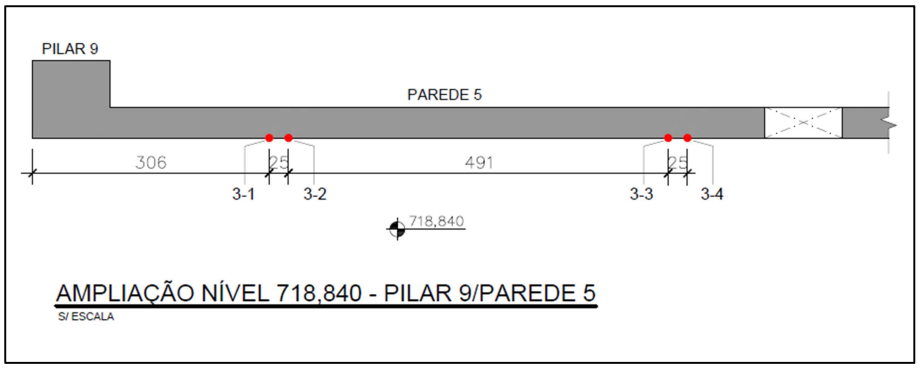


Figura 37 – Planta da ampliação da parede ensaiada, com a locação dos pontos 3-1 a 3-4

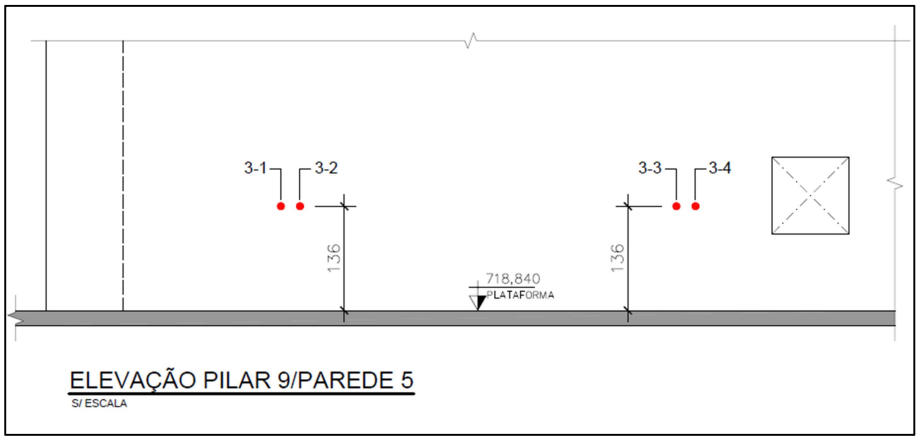


Figura 38 – Elevação da parede ensaiada

Para realização dos ensaios foi selecionada uma única parede junto à plataforma, em posição favorável para utilização do ponto de energia elétrica (Figura 39)



Figura 39 - Parede onde foram realizados os ensaios

Para realização dos ensaios foi realizada a limpeza da superfície e verificada visualmente a existência de fissuras que pudessem alterar os resultados. Para realização dos ensaios 3-1 e 3-2 foi selecionado um trecho próximo ao lado esquerdo da estrutura, a uma altura aproximada de 1,36m (Figura 40). Determinou-se a posição das armaduras e sua provável profundidade.

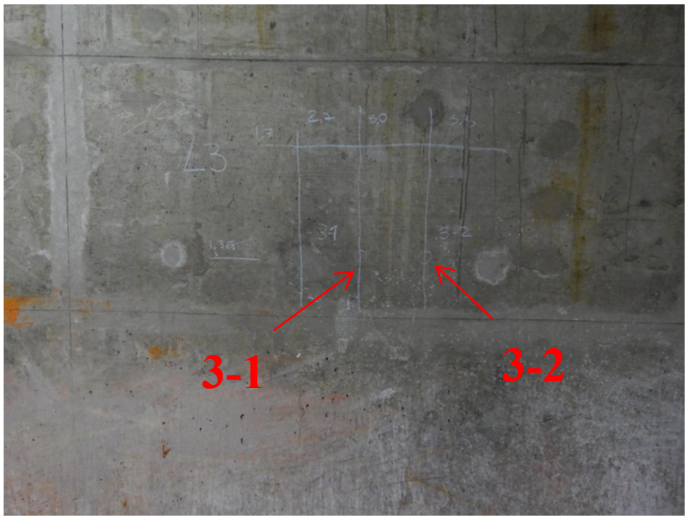


Figura 40 - Marcação das armaduras e dos pontos de ensaio 3-1 e 3-2

A seguir foi feito o rompimento do concreto por martelete de impacto nas regiões indicadas sem, contudo, conseguir chegar à armadura (Figura 41).



Figura 41 - Rompimento do concreto no ponto 3-1

Na Figura 42 representa os pontos de ensaio 3-1 e 3-2, com tamanho aproximado de 5 cm de diâmetro. A solução de fenolftaleína já havia sido aplicada.

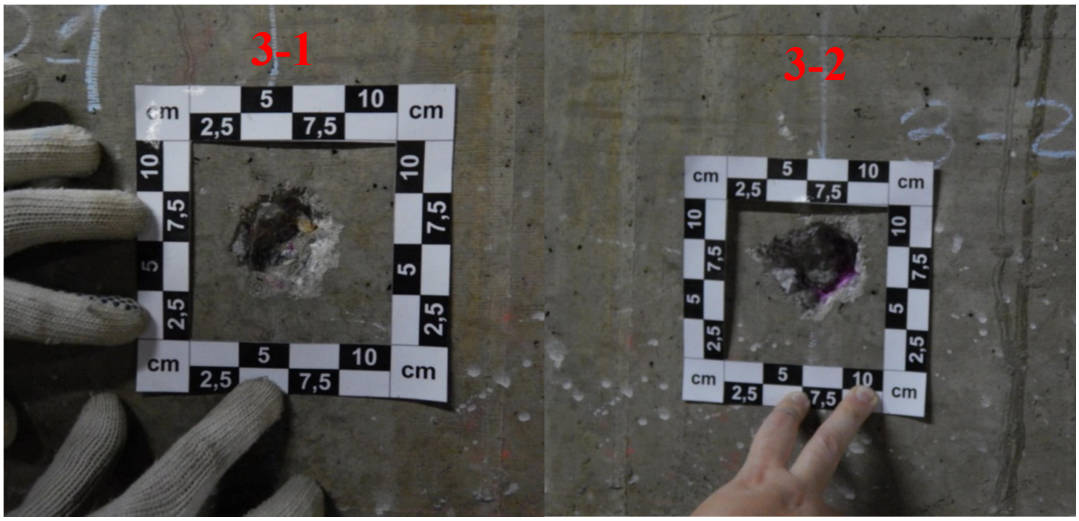


Figura 42 - Ponto de ensaio 3-1e 3-2

Para realização dos ensaios 3-3 e 3-4 foi selecionado um trecho central da parede, a uma altura aproximada de 1,36m (Figura 43).



Figura 43 - Marcação das armaduras e dos pontos de ensaio 3-3 e 3-4

Os procedimentos adotados para estes pontos de ensaio foram os semelhantes aos anteriores. A Figura 44 apresenta os pontos de ensaio 3-3 e 3-4 após a aplicação da solução de fenolftaleína, distantes aproximadamente 25 cm.



Figura 44 - Pontos de ensaio 3-3 e 3-4

3.2 ENSAIO LABORATORIAL

Foi realizado ensaio de carbonatação acelerada de corpos de prova obtidos nas obras de expansão da companhia atualmente em execução. Ambos os corpos de prova tinham dimensões de 15 x 30 cm e são aqui referenciados como CP–C, controle e CP–V, com aplicação superficial de verniz (ver Figura 45).

.

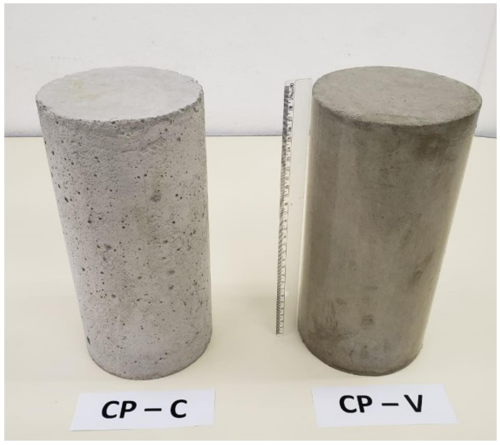


Figura 45 - Corpos de prova utilizados em ensaio de carbonatação acelerada.

Os corpos de prova de concreto, cujas características estão resumidas na Tabela 12, foram moldados conforme ABNT NBR 5738 na data de 18/04/2020.

Tabela 12 - Especificações do concreto utilizado na moldagem dos corpos de prova

fck (Mpa)	Fator a/c	Slump (mm)		Aglomerantes (kg/m3)				Água	Aditivo
				Cimento		Adição	Total		Adicionado (l/m3)
		Inicial	Final	Tipo	Consumo				Obra
35	0,548	30±10	190±10	CP III	325	-	325	53 Água 125 Gelo	2000 litros PowerFlow 1180

No dia 29/04/2020, o CP-V recebeu tratamento superficial com estucamento e aplicação de DENVERNIZ ANTIPICHAÇÃO seguindo a Especificação Técnica do Metrô e instruções do fabricante do produto (ver ficha técnica no Anexo A).

Os corpos de prova foram mantidos em ambiente natural até a data de 15/10/2020 quando foram colocados na câmara de carbonatação do Laboratório de Cimento da ABCP e assim permaneceram por oito semanas em ambiente controlado com temperatura de (23+/-2)°C, Umidade de (65+/-5)% e teor de CO2 de (5+/-1)% (Figura 46).



Figura 46 - Câmara de carbonatação do laboratório da ABCP, com os parâmetros utilizados no ensaio

Em 14/12/2020 foram retirados da câmara e cortados aproximadamente na metade das suas alturas com serra circular. Pulverizou-se solução de fenolftaleína a 1% diluída em etanol a 70%. Cabe a observação de que no caso destes ensaios não foi feito o fatiamento semanal dos corpos de prova e teste de fenolftaleína para acompanhamento do avanço da carbonatação, parte do procedimento padrão do laboratório, pois desejávamos que o tratamento superficial com verniz fosse mantido em todas as faces ao longo de todo o período de manutenção na câmara.

A Figura 47 apresenta a seção serrada do corpo de prova CP-C onde não foi aplicada camada de verniz.



Figura 47 - Seção serrada do Corpo de prova CP-C, com destaque para a região central não carbonatada (vermelho carmim)

A Figura 48 - Detalhe da espessura carbonatada (região não pigmentada)apresenta detalhe da espessura carbonatada, destacando a região não pigmentada.



Figura 48 - Detalhe da espessura carbonatada (região não pigmentada)

A figura abaixo (, Figura 49) apresenta a seção já serrada do corpo de prova CP-V onde foi aplicada camada superficial de verniz.



Figura 49 - Seção serrada do Corpo de prova CP-V, com toda seção central não carbonatada (vermelho carmim)

A Figura 50 - Detalhe do Corpo de prova CP-V, onde se observa a película do verniz apresenta o detalhe da região próximo a superfície do CP-V, onde não ocorreu carbonatação e é possível observar a película protetora formada pelo verniz antipichação.



Figura 50 - Detalhe do Corpo de prova CP-V, onde se observa a película do verniz

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios de campo e realizados em laboratório.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARBONATAÇÃO REALIZADOS EM CAMPO

Apresentam-se, nas Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15 as espessuras de frente de carbonatação (ec) obtidas nos Ensaio de Campo 1, 2 e 3. Buscou-se efetuar mais de uma medição por ponto de ensaio, e quando isto foi possível considerou-se o valor médio das medições como ec do ponto. Além da profundidade da frente de carbonatação, são apresentados os cobrimentos indicados pelo pacômetro (cobrimento estimado) e o de projeto.

No Ensaio de campo 1 as médias das medições dos pontos variaram entre 3mm e 11,6 mm. Os cobrimentos estimados com pacômetro foram inferiores aos de projeto, contudo, a remoção de concreto superou 20 mm (cobrimento de projeto) sem que a armadura tenha sido exposta.

Tabela 13 - Profundidades de carbonatação obtidas no Ensaio de Campo 1

Ponto	**Profundidade de Carbonatação - ec (mm)**		**Média (mm)**	**Cobrimento Estimado (mm)**	**Cobrimento de Projeto (mm)**
	Medição 1	**Medição 2**			
1-1	3,0	-	3,0	15	20
1-2	4,0	-	4,0	15	20
1-3	11,9	11,3	11,6	12	20
1-4	11,4	11,9	11,6	15	20

No Ensaio de campo 2 as médias das medições dos pontos variaram entre 6,6 mm e 12,5 mm. O ponto 2-3 foi desconsiderado por dúvida em relação à correta execução do ensaio.

Tabela 14 - Profundidades de carbonatação obtidas no Ensaio de Campo 2.

Ponto	Profundidade de Carbonatação - ec (mm)			Média (mm)	Cobrimento Estimado (mm)	Cobrimento de Projeto (mm)
	Medição 1	Medição 2	Medição 3			
2-1	17,5	10,0	8,6	12,0	30	30
2-2	10,5	11,6	10,3	10,8	30	30
2-3	Ponto desconsiderado			-	-	-
2-4	16,3	9,4	11,9	12,5	29	30
2-5	8,5	5,5	5,9	6,6	29	30

Todas as medições do Ensaio de campo 3 foram realizadas na mesma parede. Este ensaio foi o que apresentou menor variação absoluta dos resultados com médias de espessura de carbonatação entre 17,3 mm e 22,4 mm.

Tabela 15 - Profundidades de carbonatação obtidas no Ensaio de Campo 3.

Ponto	Profundidade de Carbonatação - ec (mm)			Média (mm)	Cobrimento Estimado (mm)	Cobrimento de Projeto (mm)
	Medição 1	Medição 2	Medição 3			
3-1	18,9	-	-	18,9	30	20
3-2	22,4	21,9	22,9	22,4	30	20
3-3	17,0	18,0	17,0	17,3	32	20
3-4	17,0	18,1	18,2	17,7	32	20

Na Tabela 16 são reunidos os resultados de ec para cada Ensaio de campo, suas médias, desvios padrão e variâncias. Pode-se observar que a maior variância ocorreu para o Ensaio de campo 1. Associando os resultados dos pontos com as suas localizações na estrutura (ver Figura 10) percebe-se que houve grande diferença entre os resultados da parede do nível térreo (811,390) que apresentou média de 3,5 mm e do nível superior (815,400) com média de 11,6 mm. Os ensaios 1-3 e 1-4 foram realizados em local próximo a aberturas, provavelmente sujeitos a molhagem em caso de chuva e mais expostos a gases provenientes da rua que os ensaios 1-1 e 1-2. A menor dispersão dos dados ocorreu no Ensaio de campo 3 em que os ensaios foram realizados na mesma parede e numa mesma altura. Disso concluímos que a dispersão dos valores de ec está relacionada à posição de ensaio dentro da estrutura.

Tabela 16 - Médias, desvios e variâncias dos ensaios de campo.

Ensaio de campo 1		Ensaio de campo 2		Ensaio de campo 3	
Ponto	**ec (mm)**	**Ponto**	**ec (mm)**	**Ponto**	**ec (mm)**
1-1	3,0	2-1	12,0	3-1	18,9
1-2	4,0	2-2	10,8	3-2	22,4
1-3	11,6	2-4	11,9	3-3	17,3
1-4	11,6	2-5	5,9	3-4	17,7
Média	7,6	**Média**	10,2	**Média**	19,1
σ	4,7	**σ**	2,9	**σ**	2,3
Variância	22,0	**Variância**	8,3	**Variância**	5,4

Na Tabela 17, apresentam-se os valores de k_{CO2} obtidos com base nos valores médios de ec para cada ensaio e das idades conhecidas das estruturas. Não se observou relação inversa entre o valor de k_{CO2} e o fck, como poderíamos esperar em função da pesquisa bibliográfica. O menor valor de k_{CO2} foi obtido para a estrutura mais antiga e com menor valor de fck. Devemos, contudo, considerar que não temos informações em relação a demais fatores que influenciam no potencial de deterioração. Também na Tabela 17 são apresentados valores estimados de vida útil residual, aqui considerado como o tempo necessário para que a frente de carbonatação atinja à armação. Observa-se que realizando este cálculo considerando o cobrimento de projeto, as estruturas dos ensaios 1 e 2 estariam atendendo ao requisito de vida útil que consta atualmente da especificação técnica do Metrô (METRÔ, 2014) que é de 100 anos mas a estação (Ensaio de campo 3), não. Se consideramos para essa estrutura o valor médio estimado com uso de pacômetro como cobrimento (31 mm), a vida útil residual seria de 67,3 anos, atendendo também a especificação em relação à vida útil. Entendemos ser essa uma estimativa mais razoável já que em todos os pontos ensaiados a remoção de concreto ultrapassou 31 mm sem que tivéssemos alcançado a armação. Além disso, ressaltamos que a exigência de 100 anos é a atual, não a vigente à época de construção desta estruturam e que a manutenção das estruturas civis do Metrô são alvo de inspeções periódicas e intervenções quando necessárias.

Tabela 17 - Cálculo de coeficiente kCO2 e estimativa de vida útil residual.

Idade (anos)	fck (MPa)	ec (mm)	k_{CO2}	Cobrimento de projeto (mm)	Vida útil residual (anos)
46	15	7,6	1,1	20,0	276,8
16	30	10,5	2,6	30,0	115,2
41	15	19,1	3,0	20,0	**4,1 (67,3)***

* Valor calculado considerando cobrimento estimado por pacômetro, diferentemente dos demais.

4.2 RESULTADOS DO ENSAIO LABORATORIAL DE CARBONATAÇÃO ACELERADA

Na Tabela 18, são apresentadas as profundidades de carbonatação medidas nos corpos de prova CP-C e CP-V. Observa-se que o tratamento superficial com aplicação de verniz impediu que se formasse a frente de carbonatação. Há que se considerar que talvez essa eficiência, não confirmada tendo como base os resultados do Ensaio de campo 2, esteja parcialmente vinculada ao fato de que no ensaio acelerado o verniz não tem degradação equivalente ao tempo em que ocorreria o avanço de frente de carbonatação detectado.

Tabela 18 - Profundidades de carbonatação medidas.

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

Utilizou-se a profundidade de carbonatação aferida no corpo de prova controle (16 mm), sem tratamento superficial, para estimativa da idade em que isso ocorreria na estrutura real, conforme sua condição de exposição (interna) e condições ambientais (umidade e teor de CO_2) estimadas. Para isso, usamos a planilha SimulaCarb desenvolvida pela professora Edna Possan e disponibilizada na disciplina “Durabilidade e vida útil das estruturas” no ano de 2019. Como resultado, estimamos que seriam necessários 32 anos para que a estrutura atingisse

16 mm e 151 anos para que a frente de carbonatação se igualasse ao cobrimento de projeto de 35 mm.

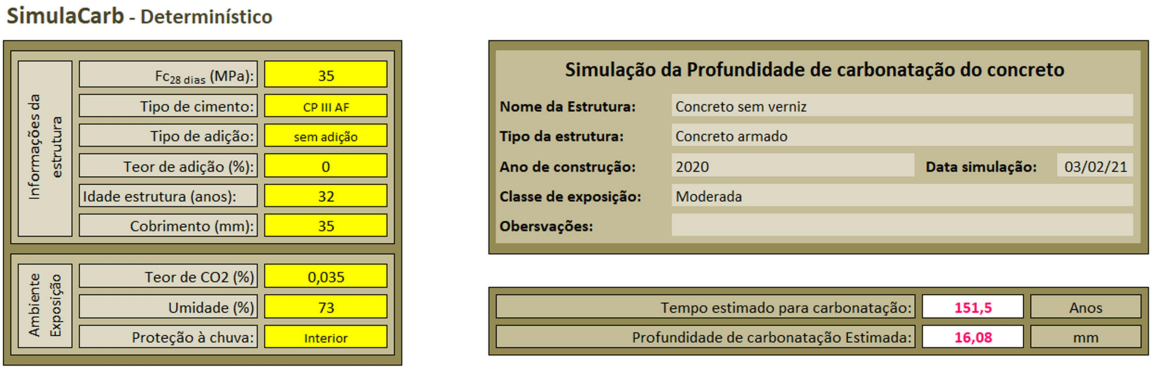


Figura 51 – Planilha de simulação de profundidade de carbonatação conforme modelo de Possan (2010).

Extrapolamos a utilização da formulação de Tuutti (1982), que se presta avaliação do potencial de deterioração em função de ensaios experimentais, e calculamos um valor de k_{CO2} com o par de valores de idade e profundidade de carbonatação (32 anos e 16,08 mm) obtidos do modelo de Possan (2010). Este resultado (2,83), bem como os valores de k_{CO2} obtidos experimentalmente nos Ensaios de campo 1, 2 e 3 estão reunidos no gráfico da Figura 52.

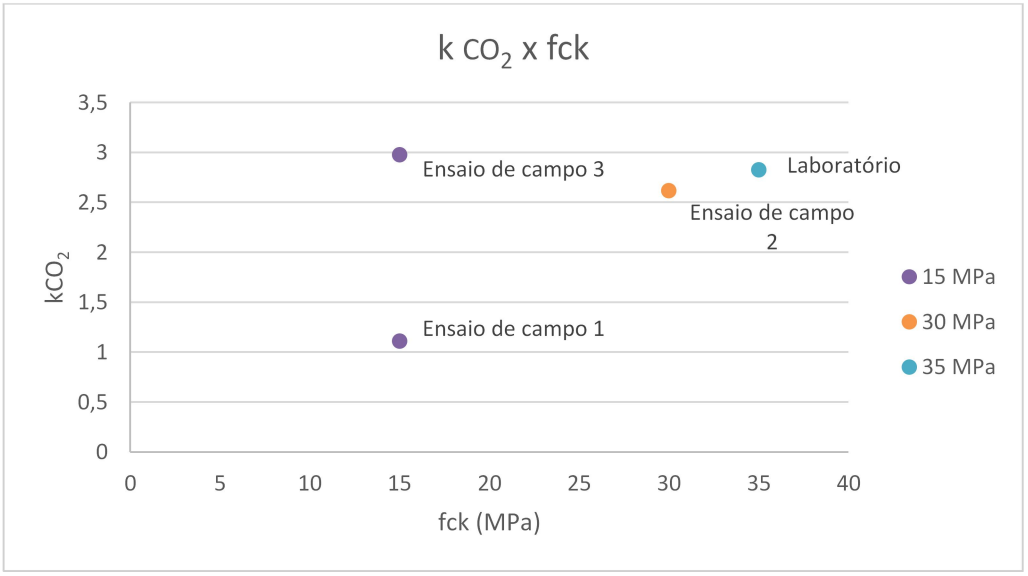


Figura 52 - Variação de k_{CO2} com o fck nos ensaios realizados.

O valor de k_{CO2} que mais se destaca, por ser inferior aos demais, é o do Ensaio de campo 1. Tomando como referência o valor de fck, fator que influencia

no potencial de deterioração do qual dispomos informação em relação a todos os ensaios, suporíamos que seu valor deveria ser maior que o do Ensaio de campo 2, com fck superior (30 MPa) e proteção superficial de verniz, e do ensaio de laboratório (fck igual a 35 MPa) e com valor próximo ao Ensaio de campo 3, com mesmo fck e menor diferença de idades entre as estruturas (5 anos).

5. CONSIDERAÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas as considerações finais que sintetizam os principais achados da pesquisa e são indicadas sugestões para trabalhos futuros com base na experiencia adquirida.

5.1 COSIDERAÇÕES FINAIS

Considera-se que foram atingidos os objetivos geral e específicos propostos e que a hipótese inicial foi corroborada, uma vez que se observaram valores de k_{CO2} diferentes nas estruturas ensaiadas.

Os valores de k_{CO2} obtidos foram comparados. Na estrutura mais antiga o valor de k foi o que apresentou menor valor médio, quase três vezes inferior ao maior valor, observado para a estrutura da estação com mesmo fck e 5 anos mais nova. Não foi possível identificar uma esperada tendência decrescente do valor k com fck, únicos dentre os fatores que influenciam no potencial de deterioração do qual tínhamos informação. Houve variação de cerca de 400 % entre resultados de ensaios de uma mesma estrutura de modo que ficou evidente que a posição dentro da estrutura influencia no avanço da frente de carbonatação.

A vida útil estimada com base nas formulações de Tuutti (1982), para ensaios de campo, e Possan (2010), para ensaios de laboratório atendeu à especificação de 100 anos para estruturas do Metrô.

A aplicação de verniz foi eficaz na inibição do ingresso do CO_2 no concreto uma vez que o corpo de prova em que este acabamento foi aplicado não apresentou carbonatação enquanto o corpo de prova controle teve média de espessura de profundidade de carbonatação de 16mm. A eficiência da aplicação do verniz em campo não foi confirmada.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerimos que, em trabalhos futuros se investigue a eficiência da proteção com verniz de estruturas com uma frente de carbonatação já instalada em ensaios em câmara de carbonatação acelerada.

É relevante também investigar comparativamente a variação da frente de carbonatação dentro de uma mesma estrutura em que haja paredes com e sem proteção por verniz. Salienta-se a importância que nos ensaios de campo seja realizado um planejamento da posição dos ensaios e que estes sejam realizados em quantidade que suficiente para avaliação estatística que permita conclusões apesar de esperadas variações de resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738 – Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575 – Edificações Habitacionais - Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

ACI – American Concrete Institute. **ACI 365.1R – Service-Life Prediction.** USA, 2000.

ARAÚJO, ADRIANA; PANOSSIAN, ZEHBOUR; **Avaliação de desempenho de verniz acrílico e verniz poliuretano antipichação como revestimento de proteção às estruturas de concreto aparente.** 28º Congresso Brasileiro de Corrosão. Recife, 2008.

ARAÚJO, FERNANDA WANDERLEY CORRÊA DE; **Estudo da repassivação da armadura em concretos através da técnica de realcalinização química.** São Paulo, 2009.

BOLINA, FABRICIO LONGHI; TUTIKIAN, BERNARDO FONSECA; HELENE, PAULO. **Patologia de Estruturas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Durability of Buildings and Buinding Elements, Products and Components.** BS 7543. Londres, 1992.

CASCUDO, OSWALDO; CARASEK, HELENA. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Capitulo 24**: **Ação da Carbonatação no Concreto.** São Paulo: IBRACON, 2011.

EUROPEAN STANDARD. **EM 1992-1-1 Eurocode 2: Desing of Concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.** Brussels 2004.

fib - International Federation for Structural Concrete. **fib Model Code for concrete structures 2010**.

JOHN, VANDERLEY M.. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Capitulo 50**: **Concreto sustentável.** São Paulo: IBRACON, 2011.

MEDEIROS, MARCELO H. F.; ANDRADE, JAIRO JOSÉ O.; HELENE, PAULO. **Concreto: Ciência e Tecnologia. Capitulo 22**: **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto.** São Paulo: IBRACON, 2011.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

METRÔ. **Especificação Técnica para Concreto Convencional Armado ou Protendido.** Documento interno: São Paulo, 2014.

METRÔ. **Relatório Integrado 2018. Disponível em:** www.metro.sp.gov.br/metro/institucional/pdf/rel-integrado.pdf. Acesso em 15/07/2019 ás 21h44min.

NP-NORMA PORTUGUESA. **EM 206-1 Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.** Portugal, 2007.

POSSAN, EDNA. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2010.

SALOMÃO, MARIA C. F.; SILVA, TURIBIO J. **Ensaio Acelerado de Carbonatação do Concreto**. XII Seminário de Iniciação Científica, UFU. Minas Gerais, 2008.

SILVA, VALDIRENE MARIA. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas executados com e sem sílica ativa.** São Carlos: EESC/USP, 2002.

SOUZA, V. C. MOREIRA; RIPPER, THOMAZ. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto.** São Paulo: PINI, 1998.

TUUTTI, K. **Corrosion of Steel in Concrete.** Stokholm, 1982.

WIKIPÉDIA. **Metrô de São Paulo**. Disponível em: https:/pt.wikipedia.or/wiki/Metrô_de_São Paulo. Acesso em 15/07/2019 às 19h24min.

ANEXO A

VERNIZES E HIDRORREPELENTE

DENVER
IMPERMEABILIZANTES

DENVERNIZ ANTIPICHAÇÃO

Verniz de alto desempenho protetor contra pichação

DENVERNIZ ANTIPICHAÇÃO é um verniz à base de resina polimérica monocomponente dispersa em solvente, que cura em contato com a umidade do ar, possui acabamento transparente brilhante e fornece total condição de limpeza em casos de pichações sem necessidade de retocar ou reaplicar o verniz.

USOS

É indicado como tratamento superficial para concreto aparente, bem como para ser aplicado sobre área externas de indústrias e residências, e proporciona acabamento transparente protetor para fachadas de alvenaria aparente, pedra, cerâmica e pintura.

VANTAGENS

- Permite facilmente sucessivas remoções de pichações com qualquer tíner comercial;
- Alta resistência ao intemperismo, não amarela e não perde o brilho;
- Protege as superfícies contra a ação de chuvas e agentes agressivos presentes na atmosfera (chuvas ácidas, poluição, penetração por cloretos ou outros sais, etc.);
- Resistente à alcalinidade do substrato.;
- Impede a impregnação das superfícies por óleos e graxas bem como a formação de fungos e microorganismos;
- Ótima resistência química a solventes, ácidos, álcalis, sais, óleos e graxas.

PROPRIEDADES TÍPICAS

As propriedades a seguir foram obtidas em ensaios de laboratório. Valores de ensaios de novos lotes podem apresentar pequenas variações.

ENSAIO	ESPECIFICAÇÃO	NORMA
Massa específica	0,89 a 0,92 g/cm³	NBR 5829
Viscosidade copo Ford 2	25 a 35 s	NBR 5849
Teor de sólidos por peso	26 a 29 %	NBR 7340
Intemperismo artificial – 2000 horas	Sem alteração	ASTMG 53
Secagem ao toque	30 a 60 minutos	
Secagem ao manuseio	120 a 150 minutos	
Tempo de secagem entre demãos a 25°C	6 horas	
Tempo de cura total	7 dias	

CONSUMO

0,05 L a 0,20 L/m²/demão.

O consumo é variável em função da absorção do substrato.

EMBALAGEM

Galão 3,6 Litros

VALIDADE

12 meses

nas embalagens intactas, armazenar em local coberto, seco e ventilado, sob temperatura de até 25 °C.

LIMPEZA

A limpeza de equipamentos e ferramentas deve ser feita com **Denversolvente 500.**

Rev. 09
Jan'14
01/03

Empresa certificada: BUREAU VERITAS

Empresa associada: GBC BRASIL

www.denverimper.com.br

VERNIZES E HIDRORREPELENTE

DENVER
IMPERMEABILIZANTES

METODOLOGIA DE APLICAÇÃO

Preparação da Superfície

1. Preparação Básica

Remover de ferros expostos (pontas de ferro), tamponar os furos das barras de ancoragem e eliminar de eventuais falhas de execução.
Efetuar lixamento do concreto ou argamassa armada mecanicamente.

Nessa fase de serviços, os abrasivos utilizados devem ser à base de carbureto de silício, por terem resistência superior à do próprio concreto ou argamassa armada, não se esfarelando e, consequentemente, evitando manchas. Os abrasivos devem ser adequados à resistência característica do concreto ou argamassa armada.

Há casos em que, por excesso de absorção da forma, a superfície ficou muito porosa, pode ser necessário promover lixamento manual (polimento).

2. Preparação Final ou Estucamento

Aplicar pasta constituída por cimento branco e cimento comum, devendo este último, ser preferencialmente, de mesma procedência do usado na concretagem, a dosagem pode variar de acordo com a necessidade de proximidade com a cor original do concreto.

Para garantir a perfeita aderência do estucamento sobre as partes porosas da superfície, a pasta deverá ser aditivada com dispersão plástica, estável, à base de resina acrílica **Denverfix Acrílico**.

O uso do estuque aditivado também evita a retração, aumenta o coeficiente de impermeabilidade e facilita o trabalho em locais de difícil acesso.

Como padrão de acabamento e referência, no decorrer da obra, devem-se executar amostras de estucamento, escolhendo aquela que mais se assemelha ao aspecto original do concreto ou argamassa armada.

A finalidade do estucamento é vedar os poros e melhorar os cantos danificados, não devendo criar camada superficial.

Todo excesso de estuque deverá ser removido através de lixamento mecânico leve ou manual. Para execução desta fase, os abrasivos são mais finos, utilizando-se granulometria 80, 100 ou 120.

Preparação da Superfície: Geral

A superfície deverá estar limpa, seca, isenta de óleos, graxas, desmoldantes e partículas soltas de qualquer natureza.

OBSERVAÇÕES

Para aplicação sobre superfícies pintadas é aconselhável executar teste prévio. Caso haja alguma reação com a pintura, aplicar uma demão inicial de **Denverniz Acqua.**

Para concreto aparente, aplicar uma a duas demãos de **Denverniz Acqua** de acordo com a absorção do substrato, para selagem da superfície.

No caso de se ultrapassar o período de 12 horas entre as demãos promover o lixamento fino a fim de garantir a aderência entre demãos.

Não deixar a embalagem do produto aberta ou semi-aberta, pois o produto reage com a umidade do ar.

VERNIZES E HIDRORREPELENTE

DENVER
IMPERMEABILIZANTES

Executar a limpeza com jato de água sob pressão. Em caso de superfícies impregnadas com óleos ou graxas, efetuar previamente a limpeza com desengraxante e desengordurante. Em superfícies com fungos efetuar previamente a limpeza com água sanitária.

Aplicação
Aplicar duas ou mais demãos com rolo de lã de carneiro de cerdas curtas (rolo para pintura epóxi) ou spray, aguardando a secagem entre as demãos.

Para a remoção da pichação basta embeber uma estopa ou pano limpo com tíner e esfregar levemente a superfície pichada até a total remoção.

MANUSEIO E SEGURANÇA

- O **Denverniz Antipichação** não deve ser ingerido. No caso de ingestão acidental não induzir o vômito e procurar auxílio médico imediato.
- Quando houver contato com a pele, remover o produto com pano embebido com óleo vegetal, lavar com água corrente em abundância e aplicar creme hidratante. Se houver contato com os olhos, lavá-los com água limpa em abundância e procurar socorro médico.
- Recomenda-se observar as normas de segurança estabelecidas pelos órgãos competentes e o uso de EPI's adequados, incluindo óculos de segurança, proteção respiratória e luvas impermeáveis. É recomendado o uso de cremes específicos como proteção adicional da pele.
- Não fumar e manter o produto longe de fontes de ignição.
- Por se tratar de um produto à base de solvente, não é aconselhável sua utilização em local fechado. Caso esta situação venha a ocorrer, recomenda-se a utilização de ventilação forçada durante a aplicação.
- Quando houver derramamento, vazamento do líquido ou gases, evacuar o local, afastar as fontes de ignição e controlar o vazamento com areia
- O **Denverniz Antipichação** é inflamável. No caso de incêndio, use água ou espuma. Não use água sob pressão.
- **Para maiores informações sobre manuseio e segurança do produto, solicite a Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ).**

DESEMPENHO
DENVER IMPERMEABILIZANTES

Garantimos a qualidade dos nossos produtos contra defeitos de fabricação, porém não assumimos a responsabilidade sobre o desempenho da obra, uma vez que não possuímos controle direto sobre as condições de aplicação. Eventuais ressarcimentos estarão limitados ao valor do produto.

Informamos que a empresa pode promover alterações nos produtos sempre que necessário, sem prévio aviso.

Os produtos devem ser aplicados por profissionais habilitados e em conformidade com as instruções constantes nos manuais de aplicação disponibilizados pela empresa.

DENVER IMPERMEABILIZANTES
Rua Vereador João Batista Fitipaldi, 500
Vila Maluf - Suzano - SP / CEP: 08685-000
Tel.: (11) 4741-6000 Fax: (11)4741-6056
E-mail: tecnico@denverimper.com.br

Os nomes dos produtos são marcas registradas da empresa.

A **Denver Impermeabilizantes** fabrica uma linha completa de produtos químicos para a construção. Para informações, treinamentos, literatura ou suporte técnico, entre em contato.

Rev. 09
Jan'14
03/03

Empresa certificada:

Empresa associada:

www.denverimper.com.br