

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS ATRAVÉS DE
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, ANÁLISE MICROESTRUTURAL E
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Sílvia Roberta Souza

Belo Horizonte

2021

Sílvia Roberta Souza

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS ATRAVÉS DE
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, ANÁLISE MICROESTRUTURAL E
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil.

Orientador (a): Prof. Dr. White José dos Santos

Coorientador: Prof. M.Sc. Ubirajara Domingos de Castro

Belo Horizonte

2021

Souza, Sílvia Roberta.

S729a Avaliação do concreto de obras de arte especiais através de caracterização física, química, análise microestrutural e ensaios não destrutivos [recurso eletrônico] / Sílvia Roberta Souza. - 2021.
1 recurso online (x,81f. : il., color.) : pdf.

Orientador: White José dos Santos.
Coorientador: Ubirajara Domingos de Castro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexo: f. 81.
Bibliografia: f. 65-80.

1. Construção civil - Teses. 2. Concreto armado - Estruturas - Teses.
3. Patologia de construção – Teses. 4. Pontes – Teses. I. Santos, White José dos. II. Castro, Ubirajara Domingos de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.
CDU: 691 (043)

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Letícia Alves Vieira - CRB-6/2337
Biblioteca Prof. Mário Werneck - Escola de Engenharia da UFMG

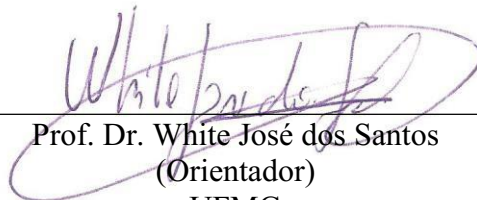
SÍLVIA ROBERTA SOUZA

**AVALIAÇÃO DO CONCRETO DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS ATRAVÉS
DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA, ANÁLISE
MICROESTRUTURAL E ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Mestrado em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 08 de setembro de 2021.

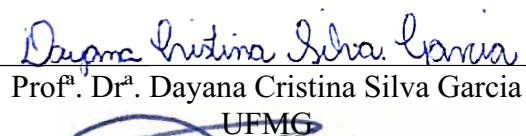
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. White José dos Santos
(Orientador)
UFMG



Prof. Dr. Ubirajara Domingos de Castro
(Coorientador)
PUC-MINAS



Prof. Dr. Dayana Cristina Silva Garcia
UFMG



Prof. Dr. Maria Teresa Gomes Barbosa
UFJF

Os referidos membros e a aluna participaram da defesa por meio de videoconferência.

RESUMO

O monitoramento e manutenção durante a vida útil em Obras de Arte Especiais (OAEs) é de extrema importância, pois consistem em pontos críticos dos sistemas de transporte rodoviário e ferroviário brasileiro. A interdição destas estruturas acarreta perdas sociais, ambientais e econômicas. Assim o objeto geral desta pesquisa é a avaliar a durabilidade dos concretos através de caracterizações microestruturais e físico-químicas em três pontes de idades diferentes (93 anos, 61 anos e 3 anos) localizadas no estado de Minas Gerais, Brasil. Sendo assim, os procedimentos consistiram em vistorias técnicas para identificar eventuais manifestações patológicas, bem como a realização dos ensaios não destrutivos: pacometria, esclerometria e carbonatação. Foram avaliadas a absorção de água, índice de vazios e massa específica, composição química, fases cristalinas, análise térmica diferencial, FT-IR e microestrutura (MEV) onde buscou-se identificar os compostos hidratados do cimento e a presença de agentes agressivos. Constatou-se que as estruturas de concreto estão seriamente degradadas em função da carbonatação, falta de cobrimento e armaduras corroídas. O efeito da carbonatação e dos agentes agressivos presentes nos rios, puderam ser identificados nas análises químicas e microestruturais, alterando os compostos hidratados. Conclui-se pelos resultados, que para evitar o comprometimento da vida útil das estruturas de concreto armado, deve-se seguir corretamente as indicações das normas técnicas (projeto, materiais, execução e manutenção) e a promoção de vistoria e manutenções corriqueiras visando a recuperação/reforço das OAEs não edificadas desta forma. Evidencia-se assim, que resultados possibilitaram um maior conhecimento do histórico das características dos materiais empregados, bem como da necessidade de vistorias preventivas a serem realizadas nas OAEs.

Palavras-chave: Obras de Arte Especiais, Vida útil de pontes, Estrutura de concreto armado, Patologia em Pontes, Microestrutura de concretos antigos.

ABSTRACT

Monitoring and maintenance during the useful life of and viaducts (SEWs) is extremely important, as they consist of critical points in the Brazilian road and rail transport systems. The interdiction of these structures entails social, environmental and economic losses. Thus, the general object of this research is to evaluate the durability of concrete through microstructural and physicochemical characterizations in three bridges of different ages (93 years, 61 years and 3 years) located in the state of Minas Gerais, Brazil. Thus, the procedures consisted of technical inspections to identify possible pathological manifestations, as well as the performance of non-destructive tests: pacometry, sclerometry and carbonation. Water absorption, void index and specific mass, chemical composition, crystalline phases, differential thermal analysis, Fourier Transform Infrared Reflection (FT-IR) and Scanning electron microscopy (SEM) were evaluated, which sought to identify the hydrated cement compounds and the presence of aggressive agents. It was found that the concrete structures are seriously degraded due to carbonation, lack of covering and corroded reinforcement. The effect of carbonation and aggressive agents present in rivers could be identified in chemical and microstructural analyses, altering the hydrated compounds. It is concluded from the results that to avoid compromising the useful life of reinforced concrete structures, the indications of the technical standards (design, materials, execution and maintenance) and the promotion of inspection and routine maintenance aiming at the recovery/strengthening of bridges and viaducts. Thus, it is evident that the results allowed a greater knowledge of the history of the characteristics of the materials used, as well as the need for preventive inspections to be carried out in the SEWs.

Keywords: special artworks, Service life of bridges, Reinforced concrete structure, Pathology in bridges, Microstructure of old concrete.

**Dedico este trabalho aos meus pais,
Luzia e Paulo,
Minha avó Sílvia,
a meu Marido Marcelo
e meu filho Yan.**

AGRADECIMENTOS

A Deus em todos os momentos de dificuldades e superações que esteve sempre comigo. Para chegar até aqui tive inúmeras pessoas e professores que sempre me apoiaram, se não fosse por eles não teria conseguido, gostaria de externar minha gratidão por todos vocês. Ao Prof. White José dos Santos, e ao meu coorientador Ubirajara Domingos de Castro que me ensinaram e me orientaram com sua paciência e dedicação neste período de grande aprendizado.

Ao Wagner do Departamento de Edificações e Estradas de Rodagem de Minas Gerais - DEER/ MG no setor de Engenharia pelo apoio e a disponibilidade e fornecimento dos projetos. Ao DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes pela disponibilidade dos projetos e esclarecimentos no trabalho em especial ao Ronan, Davidson e todos do departamento. Ao departamento de engenharia de Rio Acima em particular a Prefeita Dorinha e ao Eng. Juninho pela autorização do estudo.

Aos meus amigos que me auxiliaram nesta pesquisa, nas visitas técnicas, nos ensaios: Sandra, Fabiana, Joubert, Haroldo, Jeferson, Abner, Bruna, Alessandra, Ivana, Matheus, Jéssica, Dyala, Charles, Julio e Wiliam.

Aos técnicos da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Edilene e André da metalurgia, Thais e Alexandro do Laboratório de química, aos técnicos do Laboratório da engenharia Civil, que colaboram com este trabalho imensamente nos ensaios realizados. Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção (DEMC) Gilmar, Ariela, Ivonete e Camila, que sempre estiveram prontos a ajudar com eficiência e disposição.

Ao Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão pelos ensaios e ensinamentos na análise de microestrutural e na elaboração da dissertação. E aos técnicos do departamento de Metalurgia Samuel e Roberto. Ao Prof. Rodrigo Barreto Caldas pelo empréstimo de equipamentos e auxílio do trabalho em questões estruturais. A Prof^ª. Maria Teresa Barbosa que me disponibilizou todos os equipamentos e auxiliou em meu trabalho e na confecção dos artigos. A Prof^ª. Maria Teresa Paulino Aguilar, pelo incentivo e ensinamentos valiosos, que nunca se cansa e tem prazer no que faz se mostrando disposta a contribuir sempre. Ao Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida, pela dedicação e atenção que dispôs em me auxiliar em todos os momentos em meu estudo. A Prof^ª. Dayana Cristina Silva Garcia pelo auxílio nas análises de microestrutura.

Enfim, a todos, que de uma forma ou de outra me auxiliaram nesta jornada, minha eterna gratidão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pontes com encontros nas extremidades.....	5
Figura 2 - Junta de dilatação (a) detalhe transversal, (b) vista longitudinal	6
Figura 3 – (a) Faixas para pedestre, (b) Iluminação na ponte (c) sistema de drenagem	7
Figura 4 - (a) Travessa, Ponte BR-285/RS/SC (b) Pilares ponte entre Criciúma e Araranguá, BR 101, Aparelhos de apoio (c) Concreto, (d) Deslizante, (e) Tipo rolo (f) Elastomérico, (g) Ponte na área urbana da cidade de Bezerros-PE, (h e i) Estacas expostas e desconfiadas: devido rebaixamento do leito do rio e Ponte na BR 101/BA.	9
Figura 5- Principais patologias encontradas em obras arte pelo mundo.	12
Figura 6 - Tipos de erosões que ocorrem em uma ponte.....	16
Figura 7 - Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar.....	17
Figura 8 - Micrografia ótica do clínquer do cimento Portland (não hidratado). Fonte: Adaptado de JOHN e POOLE; 1998.	20
Figura 9 - Cimento Portland Comum: Teor de C2S e C3S; Variação, ao longo dos anos, do teor de (C3S+C2S) e, (C3A +C4AF) nos cimentos Portland; Calor de hidratação e; Variação, ao longo dos anos, do teor de (C3S+C2S) e, (C3A +C4AF) nos cimentos Portland.	21
Figura 10-Fluxograma do programa experimental	23
Figura 11- Municípios metropolitano de Belo Horizonte	24
Figura 12- Planta da ponte de Rio Acima	25
Figura 13- Ponte sobre o rio das velhas rodovias Municipal trecho Rio Acima (2019)	25
Figura 14- Planta da ponte do Ribeirão Lajes	26
Figura 15- Ponte sobre o Ribeirão Lajes (2019)	26
Figura 16- Planta Ponte sobre o Rio Paraopeba Belo Horizonte – Belo Vale.....	27
Figura 17- Ponte sobre o Rio Paraopeba Belo Horizonte – Belo Vale (2019).....	27
Figura 18- Ensaio Realizados Esclerometria, e Carbonatação.	29
Figura 19- Resultado do coeficiente de absorção e porosidade.....	32
Figura 20-Resultados de carbonatação da OBRA/A.	34
Figura 21– Obra A, Pilar do centro, (a) foto da lupa, (b) foto normal, Viga lateral, (c) foto da lupa (VL4), (d) foto normal do pilar	35
Figura 22- Resultados de carbonatação da OBRA/ B.	36
Figura 23 - Obra B bloco de fundação de coroamento (BFC1), (a) foto da lupa, (b) foto normal, Viga de ligação do rio (VLR2), (c) foto da lupa, (d) foto normal.....	37

Figura 24- Resultados de carbonatação da OBRA/PONTE C	38
Figura 25- Bloco de fundação cortina da obra C, (a) foto da lupa, (b) foto normal, Viga de ligação, (c) foto da lupa, (d) foto normal.	39
Figura 26- Ensaio de carbonatação nas OAEs.....	40
Figura 27-Cobrimento das armaduras nas OAE – A.....	40
Figura 28-Manifestações patológicas: OAE - B.....	40
Figura 29-Manifestação patológica: OAE – C	41
Figura 30- Resultados de Esclerometria da OBRA/A	43
Figura 31- Pontos dos ensaios de esclerometria da OBRA/A	44
Figura 32 - OBRA/A, Viga da cortina 2VC (a) e Laje da cortina 9LC (b)	44
Figura 33-Resultados de esclerometria da OBRA/B.....	45
Figura 34 - Pontos dos ensaios de esclerometria da OBRA/B	45
Figura 35- OBRA/B, Pilar no Rio PR6 (a) e Cortina 9C (b).....	46
Figura 36- Resultados de Esclerometria da OBRA/C	47
Figura 37- Pontos dos ensaios de esclerometria da OBRA/C	47
Figura 38- OAE-A: Pilar central – mapeamento químico – 50x.....	49
Figura 39 - OAE-B: Fundação viga geral – mapeamento químico – 50x.....	49
Figura 40 - OAE-C: Viga ligação – mapeamento químico – 50x.....	50
Figura 41 - Difração de Raios-X da argamassa (areia e cimento) das vigas.....	51
Figura 42- Difração de Raio-X do agregado graúdo das vigas.....	52
Figura 43 - Resultado de FI-TR da argamassa.....	53
Figura 44 – Apresentação de uma curva de DrTGA/ TGA/ DTA e DSC obra A.....	56
Figura 45– Apresentação de uma curva de DrTGA/ TGA/ DTA e DSC obra B	57
Figura 46– Apresentação de uma curva de DrTGA/ TGA/ DTA e DSC obra C.....	58
Figura 47– Obra A pilar central mapa 50x	60
Figura 48-Na obra A, Argamassa 2000 x.....	60
Figura 49 - Na obra A, Hidróxido de Cálcio e argamassa 6500 x - EDS CSH.....	61
Figura 50 - Na obra B, Pilar Argamassa 6500 x - EDS CSH, EDS Agregado.....	61
Figura 51- Na obra C, Viga 3000 x - EDS Quartzo - EDS CSH.....	62
Figura 52 - Na obra C, Viga 3000 x - EDS CSH, Fase Anidra.....	62
Figura 53 - Na obra C, Bloco de fundação agregados 5500 x - EDS CSH.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais características das pontes rodoviárias brasileiras ao longo do tempo.	4
Tabela 2 - Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade	11
Tabela 3 - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.	15
Tabela 4 - Composição química de Clínquer cimentos Portland de 1992 a 2021	20
Tabela 5 - Calor de hidratação dos componentes do cimento Portland.....	20
Tabela 6 - Ensaios realizados nas estruturas e análises químicas do concreto	23
Tabela 7 – Critério para avaliar a porosidade em relação à qualidade do concreto.	32
Tabela 8 - Condições de exposição das Pontes nas Obras A, B e C.	33
Tabela 9– Comparação de fatores na carbonatação na Ponte/OBRA A, B e C	34
Tabela 10 - Resultado do ensaio de carbonatação – identificação do grau de carbonatação. ..	41
Tabela 11 - Espessura de cobrimentos das armaduras.	41
Tabela 12 – Classe de Resistencia do Concreto	42
Tabela 13 –Comparação de fatores de porosidade, carbonatação e esclerometria nas OBRA /A,B,C.....	48
Tabela 14 - Composição química % dos materiais coletados nas OEAs FRX/ Via úmida / infravermelho (LECO).	50
Tabela 15 - Minerais (fases) presentes (% em massa) (Am19-2846) em proporção estimadas	51
Tabela 16 - Identificação de espectros de FT-IR (cm-1).....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS E RELEVÂNCIA DO TRABALHO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 LIMITAÇÃO DA PESQUISA	3
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 OBRAS DE ARTES ESPECIAIS	4
2.1.1 Características e elementos principais de Obras de Artes Especiais	5
2.2.2 Processo de inspeção do DNIT	9
2.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA OEAS.....	12
2.1.1 Cenário das manifestações patológicas	12
2.1.1 Durabilidade e causas de deterioração do concreto	17
2.3 ESTUDO DO CIMENTO PORTLAND DE 1900-2021.....	19
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	23
3.1 OBRAS DE ARTE ESPECIAIS SELECIONADAS	24
3.2 PROCESSO DE VISTORIA	27
3.3 ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS/DESTRUTIVOS.....	28
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	29
4 RESULTADOS E ANÁLISES	32
4.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA, POROSIDADE E MASSA ESPECÍFICA	32
4.2 CARBONATAÇÃO.....	33
4.3 ÍNDICE ESCLEROMÉTRICO.....	42
4.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS CONCRETOS	49
4.5 FASES MINERAIS DOS CONCRETOS	50
4.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DOS CONCRETOS	55
4.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS CONCRETOS.....	59
5 CONCLUSÃO.....	64
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
ANEXO 1 - SUGESTÃO PARA FICHA DESCRITIVA DA OBRA DE ARTE ESPECIAL	81
FICHA DESCRITIVA DA OBRA DE ARTE ESPECIAL.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais e relevância do trabalho

O crescente número de estudos sobre a durabilidade das estruturas de concreto armado demonstra alguns problemas relacionados a obras que possuem uma vida útil superior há 100 anos (VAYAS e ILIOPOULOS, 2014; ALEXANDER *et al.*, 2017; AZENHA *et al.*, 2016; DYER, 2014). Essas pesquisas buscam discutir problemas como a reação álcali-agregado, o ataque de sulfatos e cloretos, a corrosão do aço, os efeitos provocados pelo gelo e degelo, as implicações decorrentes de carregamentos dinâmicos nos acoplamentos das estruturas e a sua resistência ao ser submetido à ambientes agressivos (LI *et al.* 2018).

Estes estudos buscam entender os efeitos das manifestações patológicas presentes nas estruturas de concreto. Estas podem ocorrer devido às práticas incorretas das técnicas construtivas, seleção indevida dos materiais, exposição dos elementos construtivos ao meio ambiente agressivo, dentre outros fatores, que impactam em sua durabilidade (TENG *et al.*, 2014). Em particular, as Obras de Arte Especiais (OAEs-pontes, viadutos e passarelas), podem estar inseridas em diferentes classes de agressividade ambiental, como: em atmosfera da área urbana (com grandes concentrações de dióxido de carbono e alta umidade relativa), em ambientes marinhos (com respingo de maré e incidência de sais por meio da ação de íons cloreto), ou mesmo em águas fluviais (contaminadas com grande biomassa orgânica proveniente de efluentes sanitários e ou industriais) (GIRALDO *et al.*, 2014).

No entanto (LI *et al.*, 2018), a avaliação *in loco* dos elementos estruturais de concreto em grandes obras de infraestruturas é uma tarefa desafiadora, pois existem diferentes variáveis que estão envolvidas no processo (SOUZA *et al.*, 2013). Logo, é primordial estudar e desenvolver métodos capazes de propiciar uma avaliação quantitativa e qualitativa do grau de deterioração. Desenvolvendo-se assim tecnologias para aplicação nos processos construtivos que visem criar condições para manutenções preventivas ou inspeções periódicas eficientes. Com isto, pode-se identificar previamente anomalias de alto risco, a fim de facilitar o diagnóstico e a definição do adequado procedimento de intervenção (VERDECI *et al.*, 2015). A avaliação das propriedades dos materiais e suas composições em estrutura *as-built* podem contribuir com o desenvolvimento de: procedimentos de melhorias na construção, melhor definição das composições dos materiais, ampliação do entendimento das condições dos ambientes; e assim melhorando a previsão de durabilidade e vida útil (BEUSHAUSEN *et al* , 2019).

Associado a esta problemática, nos últimos anos, vários acidentes ocorreram em pontes e viadutos decorrentes, principalmente, por mudanças nas condições de utilização e por falta de serviços de manutenção da estrutura (IBRACON, 2015). Estes resultam em danos materiais, ambientais, econômicos bem como, perdas de vidas causando imensos impactos financeiros e emocionais (IBRACON, 2015). Assim, no cenário internacional, constata-se que são estimadas aproximadamente 600.000 pontes nas vias públicas nos Estados Unidos (ASCE, 2009) das quais um terço está precisando de reparos, sendo que a maioria das estruturas já foram projetadas a mais de 40 anos (MBE, 2011). Aumentou-se a atenção para inspecionar as pontes pelo menos a cada dois anos (MBE, 2011) e Fowler (2018), demonstraram que estudar acidentes buscando por falhas estruturais, é um bom exemplo para minimizar riscos futuros.

Os dados das OAEs no Brasil, segundo relatório gerencial do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) de 2018, demonstram uma rede federal com 8050 OAEs, sendo 90% classificadas como pontes e viadutos. Destas, em 4653 OAEs foram efetuadas inspeção para avaliar o estado de conservação. Verificou-se que 43% obtiveram nota técnica igual ou inferior a 3, em uma escala de 1-5, indicando um estado de conservação potencialmente problemático ou ruim (DNIT, 2018). No contexto mais regional, tem-se segundo Sinaenco (2016), que Minas Gerais conta com boa parte das OAEs construídas na década 40, possuindo uma idade superior a 50 anos. Este autor identificou manifestações patológicas graves como: muitas trincas, com possibilidade de deslocamento das placas de concreto; armaduras expostas e concretos carbonatados, denotando deterioração da estrutura; desnível entre os tabuleiros, devido a recalque diferencial; vegetação entre pilares; infiltração, dentre outros.

Constata-se que existem grandes lacunas quanto à durabilidade das estruturas submetidas a condições adversas de agressividade por longos períodos (FOWLER, 2018; ALEXANDER, 2017; AZENHA *et al.*, 2016; SINAENCO, 2016; DYER, 2014, MOON, 2011), principalmente no que tange as características do concreto. Assim, é importante entender como as características desses materiais e o meio influenciam na durabilidade das OAEs. Assim é possível buscar alternativas mais eficazes para intervenções de manutenção e preservação das OAEs.

1.2 Objetivos

O objeto geral da pesquisa é realizar a caracterização microestrutural, físico-química e *in loco* de concretos de três pontes de idades diferentes no estado de Minas Gerais, Brasil com foco na durabilidade e manutenção.

Para alcançar o objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o efeito da idade e de agentes agressivos nas características dos concretos com foco em análises não destrutivas;
- Estudar o efeito da idade e de agentes agressivos nas propriedades físicas, químicas e microestruturais dos concretos;
- Analisar e correlacionar possíveis resultados entre os de ensaio não destrutivos nas pontes com resultados físico-químicos e microestruturais.

1.3 Limitação da pesquisa

Limitou-se ao estudo de três OAEs em locais quem fossem próximos ao entorno de Belo Horizonte, no qual preconiza acesso para realização de vistorias e ensaios. Teve-se como entrave a impossibilidade de retiradas de testemunhos para realização de alguns ensaios destrutivos (resistividade elétrica, compressão, absorção por capilaridade), nos quais cada obra pertencia a um órgão, que necessitaria de autorizações por parte de duas prefeituras e DNER.

1.4 Estrutura da pesquisa

Este trabalho encontra-se estruturado conforme descrito a seguir:

- No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica, no qual busca-se embasar o atual estado arte. Delineou-se as correlações entre as normas das OEAs, seus elementos constituintes, processo de inspeção do DNIT e suas manifestações patológicas. Avaliou-se quais interferem diretamente na durabilidade e causam deterioração do concreto. Finalizou-se com um estudo da evolução da fabricação do cimento ao longo do século.
- No capítulo 3 é apresentada a metodologia para caracterização e análise das OEAs, dos concretos e de seus materiais constituintes. São apresentados os tipos de ensaios utilizados e as relativas técnicas de coleta e preparo de amostras.
- No capítulo 4 é apresentado os resultados e analisado as características obtidas nos materiais retirados das OEAs e nos ensaios não destrutivos. Avaliou-se a micro e a macroestrutura dos concretos, buscando-se correlações entre as três OEAs.
- O capítulo 5 apresenta as conclusões desse trabalho.
- O capítulo 6 reúne os conjuntos de referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.
- No anexo 1 – tem-se uma sugestão para ficha de inspeção utilizada nas vistorias.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo realiza-se uma revisão bibliográfica que permeia em temas relacionados às Obras de Artes Especiais (pontes, viadutos, passarelas) como: influência da composição do concreto e agregados utilizados das estruturas; durabilidade dos concretos; manifestações patológicas ocorridas nos concretos através de ataques químicos de sulfatos e dióxido de carbono; análises correlacionadas com a durabilidade e a resistência do concreto a estes agentes agressivos.

2.1 Obras de artes especiais

As OAEs rodoviárias federais vêm evoluindo com a época de sua construção e com mudanças nas suas estruturas como: larguras, guarda-rodas, guarda-corpo e suas classes (Tabela 1). Características distintas podem estar relacionadas a cálculos estruturais, materiais utilizados, e processos de construção. Algumas OAEs foram construídas a partir da década de 40, mas a primeira edição da norma Brasileira ocorreu somente em 1946 (DNIT, 2004a).

Tabela 1- Principais características das pontes rodoviárias brasileiras ao longo do tempo.

Período	Normas Vigentes/ Classe	Características Geométricas (Seção Transversal)
Até 1950	NB-1/1946 NB-2/1946 NB-6/1946 Classe 24	Largura total: 8,30 m Largura de pista: 7,20 m Dois guarda-rodas de 0,55 m Dois guarda-corpos de 0,15 x 0,60 m
De 1950 a 1960	NB-1/1946 NB-2/1946 NPER/1949 Classe 24	Largura total: 8,30 m Largura de pista: 7,20 m Dois guarda-rodas de 0,55 m Dois guarda-corpos de 0,15 x 0,60 m
De 1960 a 1975	NB-1/1960 NB-2/1960 NB-6/1960 Classe 36	Largura total: 10,00 m Largura de pista: 8,20 m Dois guarda-rodas de 0,90 m Dois guarda-corpos de 0,15 x 0,90 m
De 1975 a 1985	NB-1/1978 NB-2/1960 NB-6/1960 Classe 36	- Largura total: $\geq 10,80$ m Largura de pista: $\geq 10,00$ m Barreiras tipo New Jersey
Após 1985	NBR 6118/78 NB-2/1987 NBR 7188/84 Classe 45	Largura total: $\geq 12,80$ m Largura de pista: $\geq 12,00$ m Barreiras tipo New Jersey

Fonte: Adaptado de DNIT, 2004a.

2.1.1 Características e elementos principais de Obras de Artes Especiais

As OAEs correspondem a estruturas utilizadas para vencer vãos que possuam mais de seis metros sustentados ou não por apoios, construídos ou não acima de depressões ou obstruções como água, rodovias ou ferrovias. Estas se destinam a passagem de veículos, cargas móveis; para passagens superiores ou inferiores podendo incluir nesta definição os viadutos (DNIT, 2016). As OAEs geram desenvolvimentos essenciais aos seres humanos, vencendo barreiras geopolíticas, promovendo desenvolvimento, atividades econômicas, sociais e culturais da engenharia e tornando-se um ativo social que transcende a própria ponte (ZHOU e ZHANG, 2019). São divididas em três partes principais sob o ponto de vista estrutural: superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura (Figura 1).

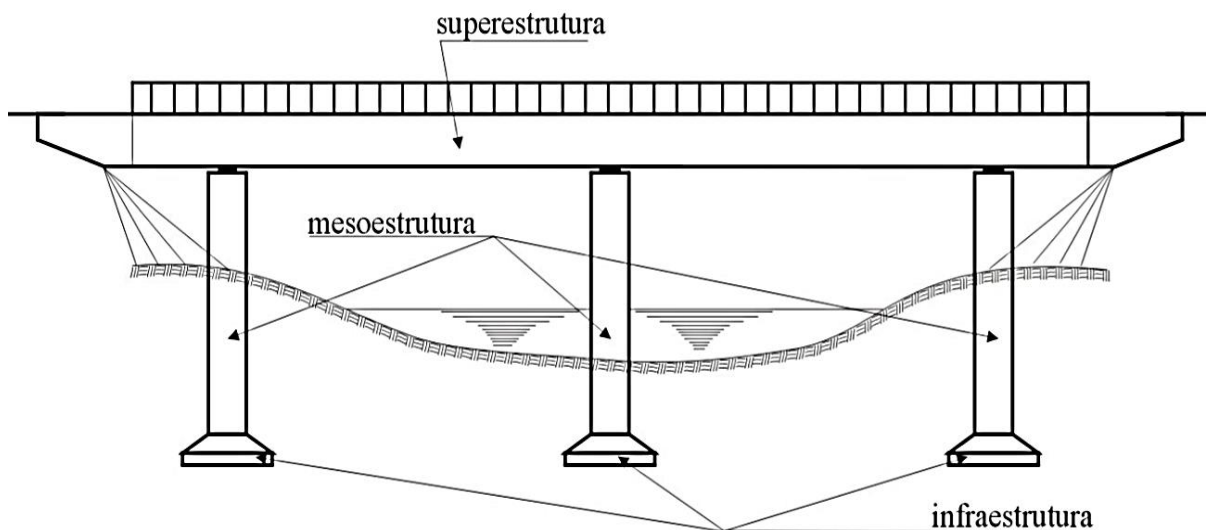


Figura 1 - Pontes com encontros nas extremidades.
Fonte: VITÓRIO, (2002)

A superestrutura é constituída pelos elementos do tabuleiro e o sistema de suporte principal, cuja função é de transmitir as cargas ao longo dos apoios. Na superestrutura tem-se ainda, os elementos de proteção, as faixas de segurança, sistema de drenagem (DNIT, 2016). Os tabuleiros correspondem a uma laje de concreto ou aço, suportada por vigas principais ou secundárias (concreto, armado ou protendido ou de aço). As lajes de transição consistem no encontro entre a OAE e a estrutura, geralmente de concreto armado. Desenvolvem as funções de cobrir vazios que podem surgir por baixo das lajes, prevenir deflexão, atenuar a diferença entre o aterro e o encontro, prevenir ou anemizar o problema de ressalto (VALEC, 2015). Devido à grande exposição das estruturas, os métodos de cura e sua duração tem implicações diretas na resistência e durabilidade do concreto destas estruturas (HUO e LING, 2006).

A combinação de expansão e retração devido a temperatura podem causar tensões de tração e ocasionar trincas ao longo da vida útil considerando um mesmo tráfego (CHU *et al.*, 2013). Para se fazer uma avaliação destes efeitos, sugere-se adotar um regime de monitoramento de pelo menos um ano para se analisar a influência da temperatura. Para sanar esta questão, tem-se as juntas de movimentação que correspondem a interrupções estruturais nos tabuleiros e vigas (Figura 2), de modo de admitir as oscilações provocadas pelas mudanças de temperatura, retração e fluência do concreto (TREACY e BRUHWILER, 2015).

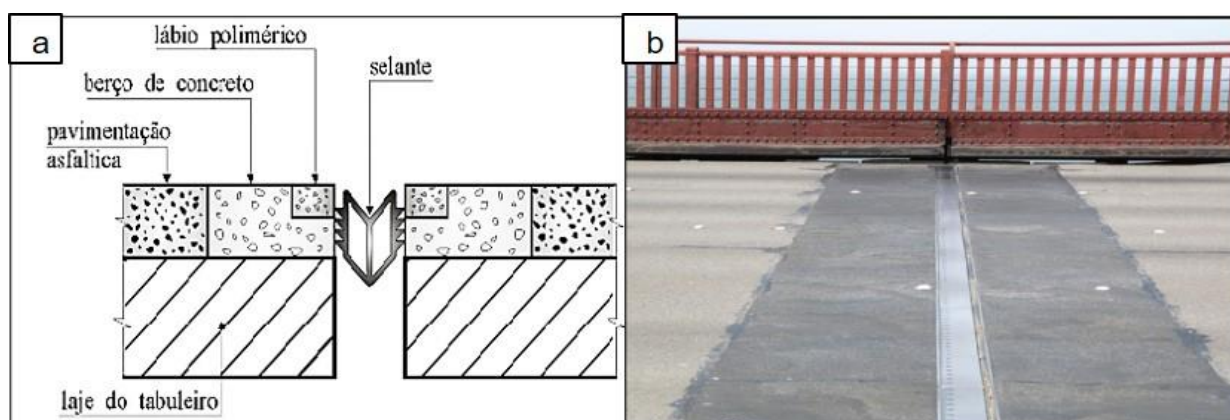


Figura 2 - Junta de dilatação (a) detalhe transversal, (b) vista longitudinal
 Fonte: Vitorio (2002), Wikiwand, Ponte Goldem Gate (2019).

Os elementos de segurança são de extrema importância, pois a falta deles ou uma manutenção inadequada prejudicam a segurança dos usuários e dos veículos. Ressalta-se que a avaliação de segurança de uma estrada também exige uma análise investigativa das geometrias e dos locais em que estão inseridas (LOPRECIPE *et al.*, 2018). Quanto aos sistemas, tem-se (DNIT, 010/2004; DNIT, 2016):

- Refúgio: inseridos no tabuleiro com comprimentos mínimos regulares de 0,45 m x 1,0 m com guarda-corpos, colocando a cada 10 m para casual passagem de pessoas;
- Guarda corpo: são elementos de proteção para pedestres e ciclista com uma distância mínima 0,60 m, sendo colocados lateralmente com utilização de materiais econômicos e leves;
- Guarda rodas: são balizadores do tráfego, confeccionados de concreto e não permitem a circulação de pedestres com segurança – tem caído em desuso;
- Defensas metálicas: são proteções metálicas flexíveis inseridas na rodovia, não fazendo parte propriamente das OAEs, sendo confeccionadas sem continuidade em superfícies salientes;
- Barreiras de segurança: são estruturas de orientação lateral construídas de concreto armado e projetadas para evitar quedas, absorver choques laterais e proporcionar recondução à faixa de tráfego.

Além dos dispositivos de segurança, as pontes podem possuir calçadas ou faixas especiais (Figura 3a) para pedestres e ciclistas; garantindo o isolamento dos fluxos e evitando ao máximo as interferências nos percursos exclusivos de cada usuário. Deve atender, também, trafegabilidade, sinalização, iluminação e drenagem. Devem focar: na sustentabilidade social adequada, no transporte, justiça ambiental e saúde pública. Destaca-se, por exemplo, que com aumento das atividades físicas e com o crescimento de bens e serviços essenciais por transportes não motorizados (TR NEWS, 2015), as pontes são partes complementares de qualquer estrada ou caminho. Contudo, ainda não existe um planejamento eficiente de veículos não motorizados, se tornando um gargalo para o tráfego de pessoas e bicicletas nestas estruturas (LOPES e ATTANAYAKE, 2016).



Figura 3 – (a) Faixas para pedestre, (b) Iluminação na ponte (c) sistema de drenagem
Fonte: Semcom (2017), DPF (2013), Hobas, (2019).

Juntamente às estruturas devem existir sistemas de sinalização e iluminação que permitam identificar todos os elementos da obra como: carga máxima permitida, gabarito vertical, gabarito horizontal, velocidade permitida e fluxo. A iluminação (Figura 3b) geralmente é em regiões urbanas ou obras especiais, para obter a visibilidade, segurança e uniformidade nos trechos da rodovia a qualquer momento do dia e da noite.

Já os sistemas de drenagem são componentes de extrema importância projetados para coletar água pluvial do tabuleiro, contento todo o sistema de captação, condução e proteção da estrutura, por exemplo, pingadeiras (Figura 3c). Nos atuais projetos de drenagem estão preconizando sistemas que evitam acúmulos de água em pontos críticos das pontes e das camadas asfálticas. Sua retenção ou vazão inadequadas pode causar deterioração do concreto e corrosão das armaduras (VLCEKl e KONCICKY, 2012).

A mesoestrutura das OAEs são os elementos de suporte da superestrutura. São responsáveis pela ancoragem da infraestrutura e seus esforços correlatos à fixação como travessas; pilares; aparelhos de apoio e os encontros das OAEs com a rodovia. Tem-se os seguintes elementos:

- Travessas: é um elemento estrutural que forma juntamente com pilar um pórtico, que transmitem as cargas que recebe das vigas de suporte do tabuleiro (Figura 4a).
- Pilares: recebem as cargas da superestrutura e outros, como por exemplo, vento e água em movimento, nos quais transmitem à infraestrutura (Figura 4b).
- Aparelhos de apoio: elementos que permitem a movimentação da estrutura, sendo localizados entre a infraestrutura e a superestrutura (Figura 4c), podendo ser fabricados de elastômetro fretado com chapas de aço e/ou aceitar aparelhos deslizantes (VALEC, 2015).
- Encontros: são estruturas que servem de ligações de transposição entre OAEs e as rodovias, servindo de apoios e elemento de contenção e estabilização dos aterros de acesso (Figura 4 a, g). Para as pontes em balaço, que não tem encontros, o trajeto da rodovia OAEs é efetuada apenas com cortinas, alas e lajes de transição (DNIT, 2004).

Os aparelhos de apoio (Figura 4 c-f) mesmo com o progresso tecnológico em ascensão, tem a sua vida útil inferior à vida útil das pontes. Nestes ocorrem várias manifestações patológicas, ocasionando problemas de estabilidade nas OAEs, tais como: colado ou congestionado; rachaduras, delaminações, perda das seções, corrosão das armaduras, presença de poeiras, água da chuva e sais de corrosão massiva; que levam à perda de seções; más conexões, problemas de ancoragens, dentre outros (CORDEIRO, 2014; CONTRERAS-NIETO *et al.*, 2019). Nos encontros, os fatores mais graves de problemas de fundações é a erosão ao longo do tempo pelas cheias nos rios. A rápida elevação do nível da água acarreta a erosão, descalçando as cabeceiras das fundações, encontros e pilares (Figura 4g). A grande pressão dinâmica da água atuando transversalmente sobre os pilares e encontros pode até causar a ruptura das pontes (VITÓRIO, 2014).

A Infraestrutura (Figura 4g) é composta por componentes estruturais que recebem as cargas derivadas dos demais elementos (verticais, horizontais, longitudinais e transversais) e as transmitem à fundação sob o solo ou rocha apropriadas para suportá-las com segurança (DNIT, 2016). Pode-se destacar que as fundações têm a função de receber todas as cargas provenientes da mesoestrutura, as quais serão transferidas para o solo onde são apoiadas. Terão que resistir às tensões e esforços solicitantes, necessitando obter uma rigidez para não ocasionar deformações. Pode-se classificá-las como rasas, tipo blocos ou sapatas; profundas como estacas ou tubulões (Figura 4 h-i). Além disso, os taludes de aterros (Figura 4h) e controle de curso de água são elementos de suma importância para garantir a integridade e vida útil da estrutura das obras de arte especiais (DNIT, 2016).

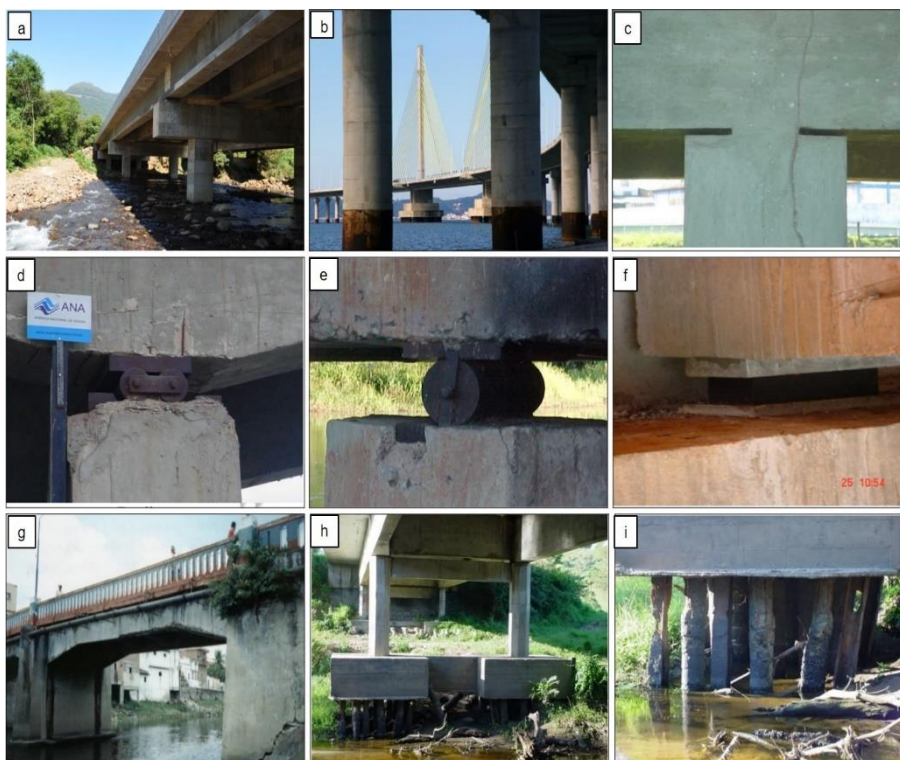


Figura 4 - (a) Travessa, Ponte BR-285/RS/SC (b) Pilares ponte entre Criciúma e Araranguá, BR 101, Aparelhos de apoio (c) Concreto, (d) Deslizante, (e) Tipo rolo (f) Elastomérico, (g) Ponte na área urbana da cidade de Bezerras-PE, (h e i) Estacas expostas e desconfiadas: devido rebaixamento do leito do rio e Ponte na BR 101/BA. Fonte: Jornal Nortesus (2019), Engeplus (2019), DNIT (2016), Vitória (2007), Vitória, (2014).

Pode-se classificar as pontes, segundo o sistema estrutural, de acordo com o comportamento das cargas transmitidas pela estrutura a partir da compressão, tração, flexão ou por combinações dessas solicitações e de combinação do material utilizado. Às pontes são comumente classificadas quanto ao desígnio de utilização, o tipo de material utilizado e quanto ao sistema construtivo adotado, sendo eles: ponte em viga, ponte em arco, ponte em pórtico, ponte estaiada, ponte pênsil, pontilhão, bueiro, galeria e passarelas (DNIT 2016).

2.2.2 Processo de inspeção do DNIT

Os manuais de inspeção do DNIT vêm sendo atualizados no decorrer dos anos. Eles têm como objetivo capacitar engenheiros e profissionais a cadastrar e inspecionar pontes rodoviárias. O primeiro manual editado no Brasil foi em 1980 pelo MT/DNFR/IPR e correlacionava-se com o manual *Bridge's Inperctor Training* (Manual 1970) e preconizavam três tipos de inspeção: Cadastral; Rotineiro e Especial. Com sua revisão (DNIT, 2004a) foram acrescentadas mais duas inspeções a Extraordinária e a Intermediária. De forma geral, estas inspeções consistem em (DNIT, 2004a):

- **Inspeção Cadastral:** é a parte documental da estrutura da obra. Assim ao término ou sua incorporação no sistema viário, deve ser realizada a fim de registrar quaisquer mudanças na estrutura; alargamentos, reforços estruturais, comprimentos ou qualquer alteração no sistema estrutural. Sendo registrada em documento fotográfico e o preenchimento da ficha cadastral.
- **Inspeção Rotineira:** é realizada visualmente, observando as condições do terreno, níveis de água, dentre outros. São feitas num período de um a dois anos planejados. Corresponde a uma vistoria para verificação do estado de conservação das OAEs e de quaisquer anomalias nas estruturas e ou divergência cadastral. São feitos documentários fotográficos e preenchimento da Ficha de Inspeção Rotineira.
- **Inspeção Especial:** que precisa ser executada no máximo em cinco anos em estruturas excepcionais, com desempenho problemático ou quando se julgarem necessário. Contém relatórios e documentário fotográfico com preenchimento da ficha padronizada de Inspeção Rotineira.
- **Inspeção Extraordinária:** é solicitada sem programação, e executada quando se constata danos causados pela natureza ou pelo homem. Esta equipe tem que ter capacidade e autoridade para estimar os danos, limitar cargas e tráfegos e requerer inspeção especial.
- **Inspeção Intermediária:** quando se deseja monitorar alguma irregularidade já determinada ou suspeita como problemas estruturais, erosão ou outro elemento qualquer. Se o objetivo da inspeção já for determinado não necessita da presença do inspetor.

Realizadas as inspeções rotineiras são atribuídas notas a cada elemento presente na Obra de Arte Especial. Para auxiliar os inspetores as notas a serem consideradas são classificadas em excelentes, boa, regular, ruim ou crítica, que variam entre 5 a 1, respectivamente (ABNT NBR-9452: 2019). As notas são dadas de acordo com os problemas detectados, analisando a parte estrutural, a estabilidade, a capacidade portante, as funcionais (conforme adequação geométrica), a segurança preventiva e a durabilidade, inerentes à vida útil da estrutura (Tabela 2).

São utilizadas fichas de inspeção de acordo com a norma NBR-9452 (ABNT, 2019). As notas definidas levam em consideração, além dos parâmetros anteriores, a importância dos elementos de segurança estrutural das OAEs, que são definidos como principais, secundários ou complementares. Podem ser classificadas segundo as irregularidades analisadas: fissuras, flechas, manifestações patológicas no concreto e armaduras, condições na estrutura de que tange a segurança, encontros de taludes, pista e tabuleiro.

Tabela 2 - Classificação da condição de OAE segundo os parâmetros estrutural, funcional e de durabilidade

Nota de Classificação	Condição	Caracterização estrutural	Caracterização funcional	Caracterização de durabilidade
5	Excelente	A estrutura apresentasse em condições satisfatórias, apresentando defeitos irrelevantes e isolados.	A obra de arte apresenta segurança e conforto aos usuários	A obra de arte está em perfeitas condições, devendo ser prevista manutenção de rotina.
4	Boa	A estrutura apresenta danos pequenos e em áreas isoladas, sem comprometer a segurança estrutural.	A obra de arte apresenta pequenos danos que não chegam a causar perda redução significativa de desempenho, desconforto ou insegurança ao usuário	A obra de arte apresenta pequenas e poucas anomalias que comprometam sua vida útil. Estrutura em região de baixa agressividade ambiental.
3	Regular	Há danos que podem vir a gerar alguma deficiência estrutural, mas não há sinais de comprometimento da estabilidade da obra. Recomenda-se acompanhamento dos problemas. Intervenções podem ser necessárias a médio prazo.	A obra de arte apresenta desconforto ao usuário, com defeitos que requerem ações de médio prazo.	A obra de arte apresenta pequenas e poucas anomalias, que comprometam sua vida útil, em regiões de moderada a alta agressividade ambiental ou apresenta moderadas a muitas anomalias, mas a estrutura está em região de baixa agressividade ambiental.
2	Ruim	Há danos que comprometem a segurança da estrutura, porém SEM risco iminente. Sua evolução pode levar ao colapso estrutural. A obra de arte necessita de intervenções significativa.	A obra de arte com funcionalidade visivelmente comprometida, com riscos de segurança ao usuário, requerendo intervenções de curto prazo.	A obra de arte apresenta anomalias moderadas a abundantes, que comprometam sua vida útil, em regiões de alta agressividade ambiental.
1	Crítica	Há danos que geram grave insuficiência estrutural. Há elementos estruturais em estado crítico, com risco tangível de colapso estrutural. A obra de arte necessita de intervenção imediata, podendo ser necessária restrição de carga, interdição parcial ou total ao tráfego e escoramento provisório, associada a monitoramento por instrumentação, ou não.	A obra de arte não apresenta condições funcionais de utilização.	A obra de arte encontra-se em elevado grau de deterioração, apontando problema já de risco estrutural e/ou funcional.

Fonte: ABNT NBR-9452: 2019.

2.2 Manifestações patológicas na OEAs

2.1.1 Cenário das manifestações patológicas

Verly (2015), Gomes *et al.* (2017), Campos (2018), Hüthwohl *et al.* (2018), Vasconcelos (2018), Rezende (2018) avaliaram várias obras de arte (Figura 5) e observaram que as manifestações patológicas mais comuns: fissuras, rachaduras, manchas de ferrugem, eflorescência, descamação, infiltrações, corrosão de armadura, falha de execução, dentre outros.

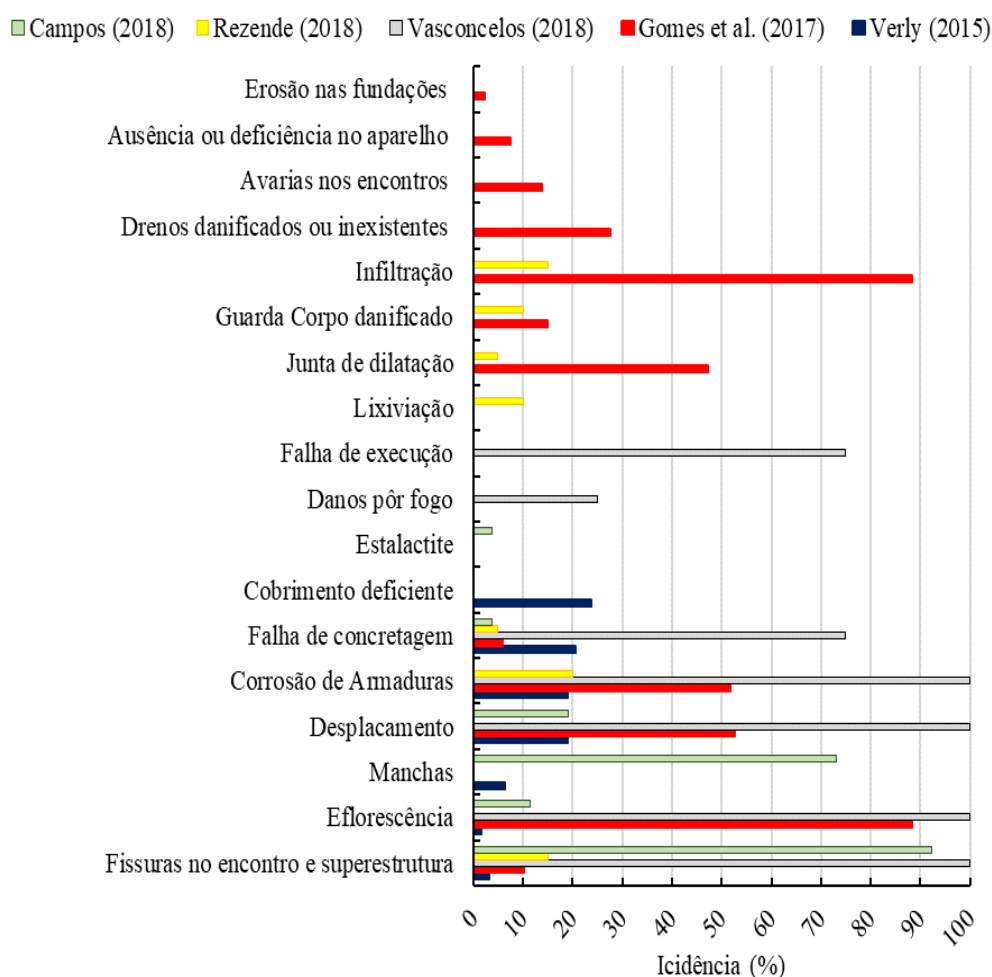


Figura 5- Principais patologias encontradas em obras arte pelo mundo.

Fonte: (Hüthwohl *et al.* (2018) – 5 obras, Verly (2015) – 22 obras, Gomes *et al.* (2017) – 332 obras, Vasconcelos (2018) - 4 obras, Rezende (2018) – 4 obras e Campos (2018) – 1 obra).

HÜTHWOHL *et al.* (2018) avaliaram e revisaram cinco manuais de quatro continentes, sendo as manifestações patológicas, mais comuns identificadas: fissuras finas, rachaduras, manchas de ferrugem, eflorescência, descamação, abrasão/desgaste, reforço exposto, semelhante aos trabalhos anteriores. A abrasão e o desgaste são difíceis de detectar visualmente, e existem diferentes definições (DNIT, 2004a). Através destas inspeções, constata-se em muitos estudos

(FOWLER, 2018; ALEXANDER, 2017; AZENHA *et al.*, 2016; SINAENCO, 2016; DYER, 2014, MOON, 2011) que existem grandes lacunas quanto à durabilidade das pontes e viadutos submetidos a condições adversas de agressividade por longos períodos. No que se refere ao estado de Minas Gerais, Brasil, constatou-se a presença de trincas, armaduras expostas e concretos carbonatados que favorecem a deterioração da estrutura; desnível entre os tabuleiros decorrente de recalque diferencial; vegetação entre pilares; dentre outros (SINAENCO, 2016).

De acordo com Nagarajaiah e Erazo (2016), os danos causados nas estruturas podem ser definidos por mutações físicas que comprometem o desempenho estruturais e mecânicos. A identificação concisa dos danos é de suma importância para a avaliação do estado da estrutura e integridade das condições operacionais para atenderem o desempenho para quais foram projetadas. Estas causas ou defeitos implicam na redução do desempenho e da vida útil da estrutura (AZEVEDO, 2011).

As manifestações patológicas do concreto armado, por exemplo, são, geralmente, identificáveis e possíveis de serem tratadas. O surgimento e as causas químicas, físicas e biológicas (ou os três concomitantes); os mecanismos de deterioração relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas, retração, fluência e relaxação. Tem-se ainda, as diversas ações que atuam sobre a estrutura, sendo as principais a se ponderar: variações de temperatura, retração e fluência (ABNT NBR 6118, 2014). A inspeção e a classificação das deformidades de inspeções nas OAEs servem como diretrizes de menção para uma avaliação do estado da pesquisa em relação aos problemas e classificação das anomalias.

Os processos principais de deterioração consistem em: vazios de concretagem, desgaste superficial do concreto, falhas causadas por colisão, fissuração, sobrecargas excessivas, recalque de apoio, esmagamento do concreto. Os vazios de concretagem são as falhas (vazios ou ninhos) geradas devido ao mal lançamento ou adensamento (DNIT, 2004a). A armadura fica desprotegida devido à falta de material resistente maximizando a chance colapso da estrutura.

O passar das décadas gerou um aumento maximizado do tráfego em todo o mundo. Por exemplo, na Europa, o transporte rodoviário de mercadorias aumentou 35% entre 1995 e 2010, e levou um aumento do peso do caminhão, permitindo a introdução de veículos mais altos e mais longos em alguns locais, como a Escandinávia. Diante disto, avaliar as condições reais das estruturas geram grandes preocupações, pois estas entram em um estágio de envelhecimento, o que deteriorada provocam risco de segurança e seu bem-estar. Nos últimos anos, elaborou-se modelos de capacidade de carga e tráfego nos quais foram demonstrados a grande necessidade da manutenção e orçamentos de gestão (LI *et al.* 2012) em prol da incorporação de reforços ou

de indicação de limitação de usos de diversas obras de arte. Destaca-se que, em termos de cargas, tem-se efeito de sobrecarga, agravos por fadiga, probabilidade de falha, dentre outras (O'BRIEN et al., 2014; ZHOU *et al.*, 2014).

Diante do fluxo automotivo, constata-se o desgaste superficial do concreto dos pavimentos submetidos a tensões alternadas e tensões de abrasão causada pelo carregamento cíclico das rodas do veículo, mas também à erosão iônica no ambiente natural (ZHANG *et al.*, 2019). Pode ser classificado de acordo com: a profundidade do desgaste em leve, médio, pesado e severo (DNIT 090/2006); permeabilidade e em relação ao gelo-degelo. A deterioração da superfície do concreto permite a penetração dos íons de cloreto, ocasionando corrosão das armaduras no interior do pavimento, nos quais se expandirão levando a rachaduras e delimitações, causando um dano secundário portanto reduzindo sua vida útil (SHEN *et al.*, 2017 e ZHANG *et al.*, 2019).

Tem-se ainda, que com o grande crescimento das cidades e infraestruturas de transporte, com a elevação do tráfego nas áreas urbanas, as colisões em edifícios e de pontes são frequentes no mundo (BRACKIN *et al.*, 2012 e AGRAWAL, 2011) e podem ou não comprometer as estruturas de acordo com sua deformidade. De acordo com *Federal Highway Administration* veículo ou navio, a colisão é a terceira maior causa de colapso da ponte nos Estados Unidos (EUA) (AGRAWAL, 2011). De acordo com a norma DNIT (2010), as pontes rodoviárias brasileiras sofrem graves avarias provocadas por colisões de veículos ou barcos, nos apoios, guarda-rodas, nas lajes, vigas e demais componentes. Estes acidentes têm causas devastadoras, diminuindo drasticamente a resistência após o impacto dos pilares de concreto, necessitando ser investigada força axial, momento de flexão, força de cisalhamento, nos quais não é previsto em projetos (DO *et al.*, 2018). Na maioria das vezes, deve-se restabelecer a estrutura após o episódio, fazendo uma avaliação estrutural e da possível perda de estabilidade (DNIT, 2010).

Associado a este cenário, nos últimos anos, tem-se utilizado o concreto como material de construção, devido a suas características como: alta resistência à compressão, boa durabilidade e custo baixo (MUHAMMAD *et al.*, 2016); SNOECK *et al.*, 2018). No entanto, como é um material heterogêneo multifásico, ele possui baixa resistência à tração, alta fragilidade e de fácil fissuração, afetando seu desempenho circunstancialmente a longo prazo e sendo difícil evitar pequenas rachaduras na superfície do concreto. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), deve-se projetar focando em quantidade máxima e limites para aberturas das fissuras, cobrimentos mínimos para cada ambiente nos quais onde estão inseridas para preservação das armaduras. As fissuras consideradas médias ou grandes (grandes não ultrapassem 0,5 mm e já são classificadas como trincas). As fissuras capilares não oferecem riscos estruturais, mas as médias

e as grandes, sejam vivas ou mortas, devem ser mapeadas na largura, na locação e na orientação. Elas devem ser monitoradas (placa de gesso, fissurômetro ou lâmina de vidro) e conforme incidências de ferrugem ou eflorescência, precisam ser tratadas (DNIT, 2004a).

Do ponto de vista estrutural, os recalques nas pontes ocorrem geralmente nas estruturas de encontro. Podem ser pequenos e não afetariam significativamente o funcionamento e segurança. Se ocorrer um recalque diferencial dos apoios do encontro (dependendo do comprimento da ponte e do seu vão) poderão causar graves danos estruturais. As causas mais comuns dos recalques nos aparelhos de apoio são: assentamento do solo de fundação, erosão e deterioração dos materiais do próprio encontro (DNIT, 2004a). Pode-se elencar ainda, o esmagamento do concreto que consiste fundamentalmente na centralização de tensões de compressão superior ao que o material ou elemento pode suportar. Estas tensões são provocadas por falhas nas estruturas ou carregamentos que estão acima do previsto em projetos. Pode ser ocasionado por falhas nos apoios ou movimentação das estruturas promovendo fissuras e deslocamento do concreto (VERLY, 2015). De acordo com Medeiros (2011), a tabela 3 apresentada uma visão geral dos principais mecanismos físico-químicos de deterioração das estruturas de concreto armado e protendido.

Tabela 3 - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.

Agressividade do ambiente		Consequências sobre a estrutura	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações iniciais na superfície	Efeitos a longo prazo
Carbonatação	UR 60 % a 85 %	Imperceptível	Redução do pH corrosão de armaduras fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera acida, águas puras	Eflorescências, manchas brancas	Redução do pH corrosão de armaduras desagregação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, cura ineficiente UR <50	Fissuras	Fissuração e corrosão das armaduras
Fuligem	Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	Manchas escuras	Redução do pH corrosão de armaduras
Fungos e mofo	Temperaturas altas (>20 °C e < 50 °C) UR > 75%	Manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH corrosão de armaduras
Concentração salinas Cl ⁻	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	Despassivação corrosão de armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras
Álcalis-agregado	Composição do concreto	Fissuras Gel ao redor do agregado graúdo	Expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras

Fonte: Medeiros *et al.* (2011).

Para alcançar vãos maiores (30 a 350 m) as pontes têm sido construídas a partir de concreto protendido. Nos últimos anos, vem aparecendo desvios excessivos em vigas protendidas,

principalmente em concretos confeccionados no local, cujas deflexões estendem à medida que o tempo avança. Bažant *et al.* (2012 a, b) apresenta que muitas análises e projetos a respeito de fluência e retração, foram mal avaliados gerando excessivas deflexões - maiores que o previsto.

Em pilares (

Figura 6) podem ocorrer infraescavação, ou seja, erosão localizada próxima aos pilares de pontes, descalçando as sapatas de fundação ocasionando assentamentos exagerados ou expondo estacas que acabam por se deteriorar perdendo capacidade de sustentação.

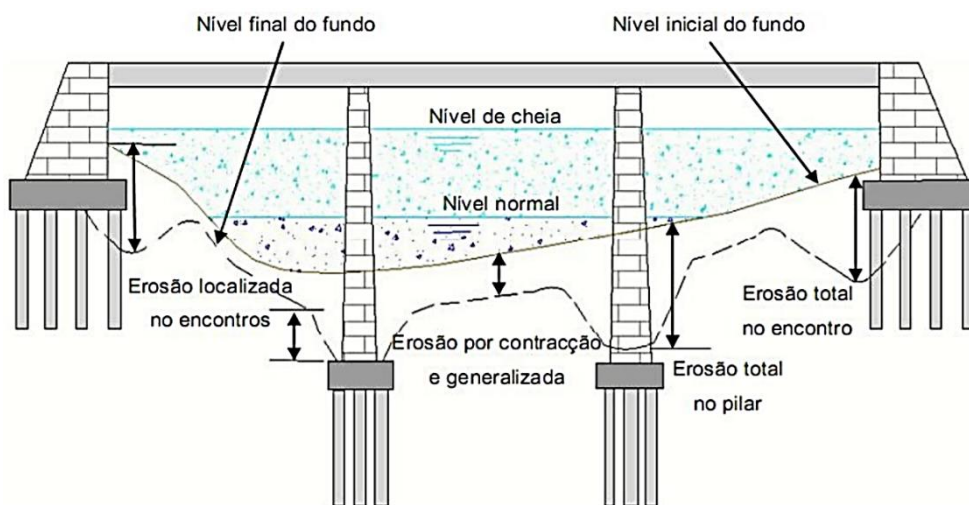


Figura 6 - Tipos de erosões que ocorrem em uma ponte
Fonte: Adaptado de Melville e Coleman (2000).

Nas pontes, encontra-se três tipos distintos de erosões, com probabilidade de existirem em eventos simultâneos (VITÓRIO, 2016; CARDOSO, 2008):

- As erosões por motivos diversos à existência de barreiras e ocasionalmente, dividem-se em dois tipos: as de curta duração, por exemplo, durante de cheias esporádicas; e as de longa duração que se formam quando as cheias, com tempos de retorno de vários anos.
- Erosões por contração, originadas pelo estreitamento da seção transversal de escoamento, aumentando a velocidade e a capacidade erosiva e, conseqüentemente, as tensões de arrastamento nos fundos das novas secções geradas.
- Erosões localizadas, que se desenvolvem junto aos pilares e encontros das pontes.

Figura 7 observa-se os movimentos de fluxo encontrados junto ao pilar, esteja a montante ou a jusante e, na cavidade de erosão formando um gradiente de pressão adverso imposto pelo obstáculo. Isso resulta no chamado turbilhão de ferradura turbulento (vórtices

Ferradura), que desempenham um papel importante na condução do transporte de sedimentos e vasculha os pilares da ponte nos leitos dos rios, o que é uma das principais razões para a falha da ponte (QI *et al.*, 2016 e ZHANG *et al.* 2019). Os vórtices de esteira consistem na separação do escoamento na superfície lateral dos pilares de onde se desprendem periodicamente. Estes apresentam sentidos de rotação alternadamente opostos ao longo do percurso para jusante. No processo erosivo, tem um efeito de sucção, quase vertical, que juntamente com o efeito de arrastamento do material do fundo do vórtice em ferradura, removem esse material e o transportam em suspensão (CALÇADA, 2012).

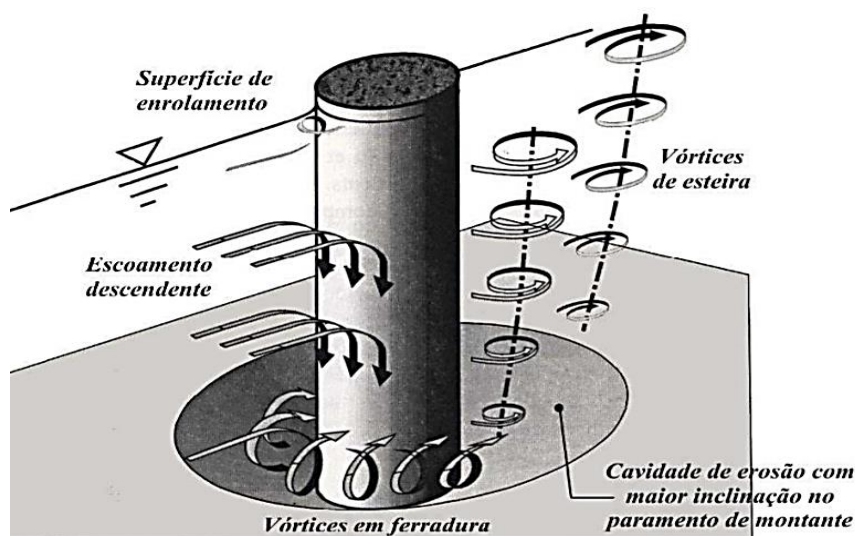


Figura 7 - Estrutura do escoamento na proximidade de um pilar
 Fonte: Adaptado de Melville e Coleman (2000).

2.1.1 Durabilidade e causas de deterioração do concreto

As obras de estrutura de concreto, com estudos de durabilidade e vida útil vem se destacando com grandes importâncias por onerarem os orçamentos de construção no mundo. A carbonatação, a presença de sulfatos e de íons cloretos são os mecanismos mais perigosos que influenciam a durabilidade da estrutura e são a razão predominante na aceleração do início da corrosão das armaduras das estruturas e dos reforços (XU *et al.*, 2019; QIANGS *et al.*, 2013). Está relacionada a capacidade do concreto de resistir aos ataques químicos, físicos e biológicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, fazendo com que seja durável (DEVI, 2018). A durabilidade das estruturas pode ser comprometida com escolha inadequada dos materiais; avaliação ineficiente dos condicionantes do ambiente onde está inserida; execução, a manutenção e ao uso do empreendimento adequados; prejudicando assim a sua segurança (BARBOSA *et al.*, 2011; TANG *et al.*, 2015). Assim, a NBR 6118 (ABNT, 2014) considera que a estrutura deve ser projetada e executada respeitando as especificações de confecção do

concreto, recebimento e cura. Destaca ainda a observância das classes de agressividade quanto à relação a/c e a cobertura das armaduras.

Ao diagnosticar as manifestações patológicas, pesquisa-se as origens e as possíveis causas, onde ocorrem defeitos e anomalias nas estruturas. Com isto, pode-se delinear os métodos de recuperação mais adequados para ação de reconstituição da parte afetada. As causas podem ser estruturadas em físicas, químicas e biológicas.

As causas físicas correspondem aos efeitos nas estruturas de concreto devido a ação física e que podem ser superficiais ou por fissuração. Os efeitos superficiais estão ligados ao desgaste com perda de materiais. A fissuração está relacionada a intempérie, a inadequada ou a não realização da cura do concreto. No caso da cura, tem-se que, à medida que, no processo de secagem, a água livre e a adsorvida por tensão hidroestática nos pequenos capilares é reduzida significativamente (GUNEYISI *et al.*, 2010) e isto pode levar a retração e assim a fissuração. Esta remoção da água, gera mudança na microestrutura do concreto, com aumento da zona de transição de interfacial (região mais fraca da matriz) e geração de fissuras que se estende na interface dos agregados até superfície do concreto, reduzindo propriedades mecânicas (MARUYAMA *et al.*, 2016 e ZHANG, *et al.*, 2013). A água, quando em fluxo de reduzidas velocidades, como onda, subcorrente e maré, pode causar também lixiviação de cálcio e abrasão hidráulica (LI *et al.*, 2015). São consideradas grandes ameaças à durabilidade das estruturas de concreto como pontes, portos, represas, tubulações e túneis (BASHEER *et al.*, 2001).

Já as causas químicas estão diretamente ligadas a interações entre os agentes químicos e o concreto, no qual tem uma estabilidade de pH variável entre (12,5 a 13,5). Os ataques externos podem gerar a diminuição do pH, reduzindo a alcalinidade do meio, sendo considerado agressivo e podendo levar a deterioração da estrutura e ao filme passivador e, conseqüente, gerando a corrosão das armaduras. Neste contexto, tem-se a carbonatação que corresponde a uma reação química entre dióxido de carbono presente no ar e o hidróxido de cálcio (produto de hidratação de cimento alcalino). Essa reação diminui a alcalinidade do concreto e, assim, destrói o filme passivo inicialmente formado em torno das barras de aço levando-a à corrosão (ZHANG, 2016). Além disso, deve-se destacar que a taxa de reação de corrosão também cumpre um papel enorme no processo de degradação (CHEN *et al.*, 2016). Nos quais as abordagens tradicionais, baseiam-se em valores limites de relação água/aglomerante e teor de cimento, resistência à compressão e propriedades dos materiais em exposição a agentes agressivos de deterioração (TUTIKIAN, HELENE, 2011).

Dentre as principais causas da deterioração do concreto por ataques químicos, pode-se citar a sua exposição às substâncias químicas nocivas, normalmente encontradas nas águas subterrâneas, no solo e água do mar, possuindo elevado potencial de degradação (DNIT, 2010). Entre os agentes agressivos, os sulfatos e cloretos são os íons mais agressivos à durabilidade das estruturas de concreto. Estes reagem com a matriz cimentícia, formando produtos expansivos, e promovendo rachaduras, fragmentações e falhas estruturais (MAES, BELIE 2014; PASUPATHY *et al.*, 2017). Zhao *et al.* (2020) demonstram que o processo de dosagem/mistura também pode afetar a durabilidade do concreto, sendo que os moldados *in loco* já sofrem desde o momento de sua confecção, mais degradações físicas e perdas quando submetido a sulfatos. Assim como os cloretos que aceleram a degradação do concreto quando conduzidos pelo sulfato, principalmente pelo início do estágio. A difusão de sulfato é acelerada pelos cloretos devido a combinação sulfato-cloreto.

A durabilidade do concreto também pode ser influenciada por agentes biológicos, no qual a secreção de microrganismos libera enzimas e metabólicos corrosivos que reagem com a superfície do concreto (KIP, VEEN, 2015). O primeiro a estudar a deterioração por bactérias foi Parker (1945), no qual analisou cinco amostras de concreto corroídos expostos a bactérias *Thiobacillus* só numa atmosfera de um sistema de esgoto. Constatou-se a formação de produtos expansivos causando deterioração do concreto (HAILE, ALLOUCHE, 2008), reduzindo a sua integridade e vida útil (WEI *et al.*, 2010). Em ambientes favoráveis, como umidade elevada, alta concentração de dióxido de carbono, íons cloreto ou outros sais, sulfatos e pequenas quantidades de ácidos (pH baixo) pode auxiliar no crescimento de microrganismos na superfície do concreto, aumentando a biodegradação (Wei *et al.*, 2013).

2.3 Estudo do cimento Portland de 1900-2021

O cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil, com grande importância para a indústria (PELISSER, 2010). Para os cimentos comuns, a primeira fase consiste na obtenção do clínquer pela queima em alta temperatura (≈ 1500 °C) de uma mistura de 80% de calcário e 20% de argila. A análise química (Tabela 4) dos cimentos de 1992 até 2021 (PLASSAIS, 2003; FARINAS & ORTEGA, 1992; SOUZA *et al.*, 2020; MARTINS, 2021) demonstram pouca variabilidade dos componentes. Podendo-se destacar a presença de forma mais amplas dos compostos químicos: CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃.

Tabela 4 - Composição química de Clínquer cimentos Portland de 1992 a 2021.

Óxido	Farinas, Ortega (1992)	Plassais (2004)	Souza <i>et al.</i> (2020) CP II-F-32	Martins (2021) CPI-32
CaO	59,83 - 64,50	62-67	61.59	63.3
SiO ₂	14,41 - 23,22	19-25	17.92	19.9
Al ₂ O ₃	3,02 - 6,29	2-9	4.27	4.34
Fe ₂ O ₃	1,61 - 4,20	1-5	2.94	2.38
SO ₃	1,72 - 7,07	1-3	-	3.55
MgO	1,04 - 3,95	0-3	3.01	2.68
K ₂ O	0,17 - 0,59	0.6	-	0.98
TiO ₂	0,18 - 0,32	0.2	-	0.23
Na ₂ O	0,07 - 0,64	-	-	0.17
SrO	0,04 - 0,32	-	-	-
Mn ₂ O ₃	0,04 - 0,28	-	-	0.05
ZnO	0,01 - 0,03	-	-	-
Cr ₂ O ₃	0,01 - 0,08	-	-	-
P ₂ O ₅	0,12	-	-	-

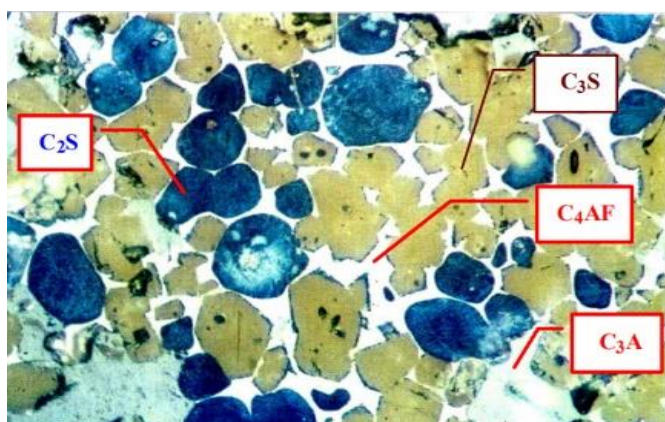
Fonte: Plassais (2003); Farinas, Ortega (1992); Souza *et al.* (2020); Martins (2021).

Após a hidratação, os elementos combinados (Tabela 5) formam aproximação 90% de Alita (C₃S – Silicato Tri-cálcico) e Belita (C₂S – Silicato Di-cálcico) (PLASSAIS, 2004; GLASSER, 2005; THOMAZ, 2008), conforme visto na Figura 8.

Tabela 5 - Calor de hidratação dos componentes do cimento Portland.

Componentes	Teor ¹ (%)	Teor ² (%)	Calor (kJ / kg)
C ₃ S	37 a 68	60-65	517 + H ₂ O C- → S-H e C-H
C ₂ S	6 a 32	20-25	262 + H ₂ O C- → S-H e C-H
C ₃ A	2 a 14	4-12	1114 + H ₂ O+ gesso → C ₄ ASH ₁₂ 1672 + H ₂ O + gesso → etringita
C ₄ AF	5 a 15	1-5	419 + H ₂ O + C-H → hidro-granada

Fonte: Adaptado de Glasser, 2005 e Plassais; 2004.



Legenda:

Castanho = C₃S = Alita;
Azul = C₂S = Belita;
Cinza = C₃A = Tri-cálcio Aluminato
Branco = C₄AF = Ferrita = Cálcio Alumino-Ferrita).

Terminologia:

C = CaO A = Al₂O₃
S = SiO₂, H = H₂O
F = Fe₂O₃ S = SO₃.

Figura 8 - Micrografia ótica do clínquer do cimento Portland (não hidratado).

Fonte: Adaptado de JOHN e POOLE; 1998.

Cada elementos influência nas propriedades dos cimentos, sendo que, por exemplo, quanto maior o teor de C₃S e de C₃A, maior o calor de hidratação do cimento. Com o passar

dos anos houve o aumento da finura do cimento e o aumento C_3S , e a diminuição C_2S gerando um crescimento contínuo em problemas de fissuração e de deterioração. Isto ocorre devido ao maior teor de C_3S que gera um ganho na resistência inicial (Figura 5 e Figura 9), contudo promove grande geração de calor de hidratação (Figura 5 e Figura 9), sendo que ao resfriar o concreto retrai e fatura (GLASSER, 2005). Para evitar é necessária cura adequada.

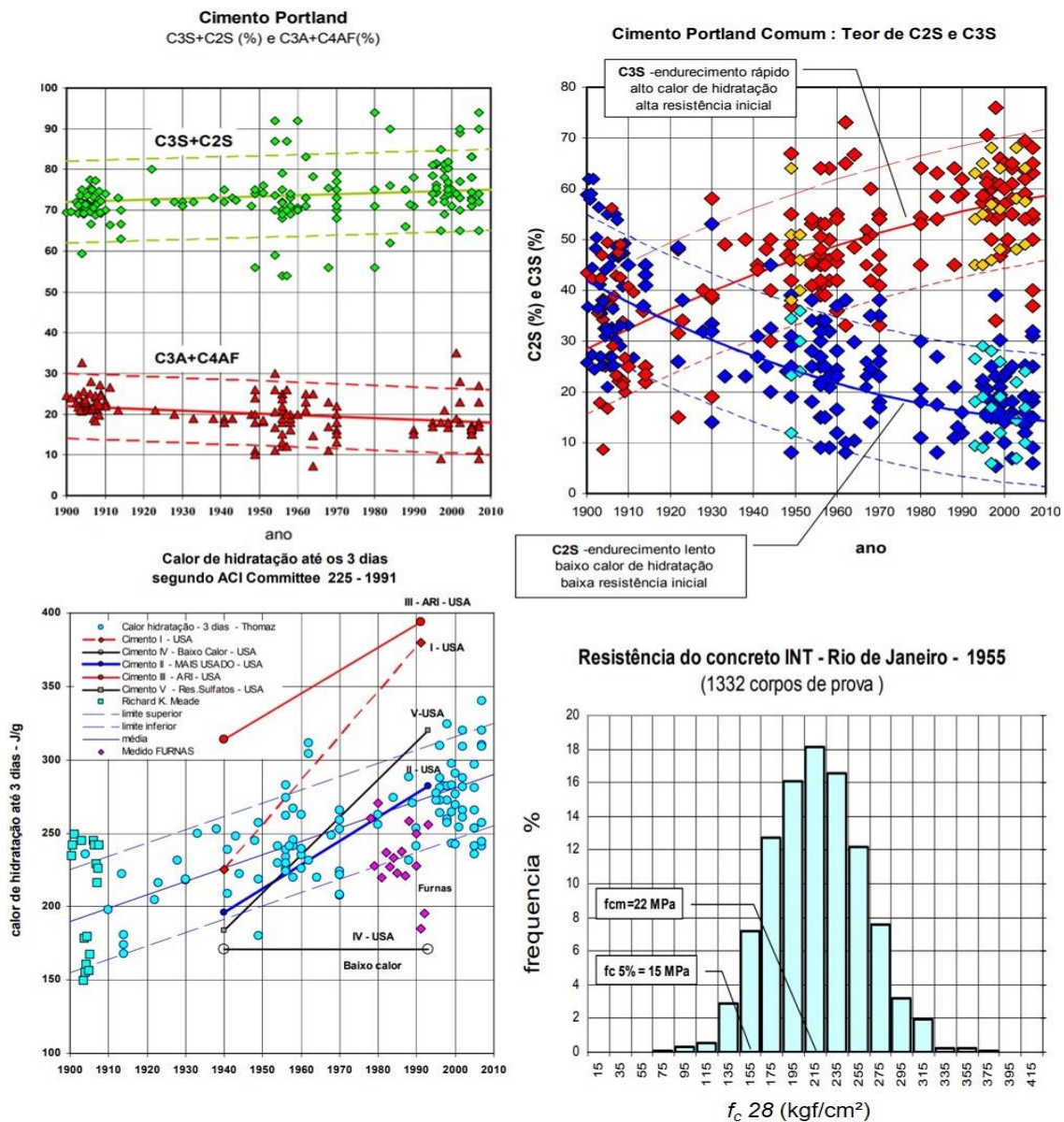


Figura 9 - Cimento Portland Comum: Teor de C_2S e C_3S ; Variação, ao longo dos anos, do teor de (C_3S+C_2S) e, ($C_3A +C_4AF$) nos cimentos Portland; Calor de hidratação e; Variação, ao longo dos anos, do teor de (C_3S+C_2S) e, ($C_3A +C_4AF$) nos cimentos Portland.

Fonte: adaptado de: PCA (2008); Chamecki (1957).

De acordo com Thomas (2008), pode-se constatar que tiveram grandes alterações nos valores do calor de hidratação dos concretos ao longo dos anos de 1992 a 2010 (Figura 9), sobretudo ao aumento da finura do cimento devido a melhor eficiência dos processos de

moagem. O que corroborado por Metha e Burrows (2001) que apresenta que a produção de cimentos anteriores a década de 1930 tinham finura (superfície específica Blaine) aproximadamente de $195\text{m}^2/\text{kg}$ e sua composição continham quantidades pequenas de silicato tri-cálcico (menos que 30 %). O estudo de Price (1970), descreve que teor de C_3S do cimento Portland Tipo I da ASTM aumentou, nesta época nos U.S.A., para 50 % e a finura Blaine subiu para $300\text{m}^2/\text{kg}$.

Na produção atual dos cimentos ASTM Tipo I e Tipo II e os Brasileiros CPI, CPII, CPIII, CPIV, CPV-ARI (ABNT NBR16697:2018; ABNT NBR 5753:2016) podem ser encontrados com teor de C_3S maior que 60% e com finura maior que $400\text{ m}^2/\text{kg}$. Esta condição de aumento gradual C_3S e a finura dos cimentos comuns proporcionaram altas resistências iniciais. Estes benefícios surgiram associados a maior demanda por controle em relação aos concretos atuais que tendem a fissurar mais, ter menor fluência, maior retração térmica por secagem, e o maior módulo de elasticidade.

Destaca-se que houve grandes mudanças no mundo na produção sistemática da resistência do cimento com um aumento da resistência aos 28 dias, e aos 7 dias em função da fixação do fator (água/cimento) (NEVILLE, 1994). A principal razão para isso foi o grande aumento do teor médio de C_3S de 47% em 1960 e para 54% em 1970 e para 65% em 2018 (ABNT NBR16697: 2018). Entre os anos 1979 e 1984, o concreto tinha uma resistência de 32,5 MPa e requeria um fator água/cimento 0,50, sendo que em 1970 já se conseguia produzir com água/cimento 0,57. Em 1984 sendo mantida sua trabalhabilidade com uma quantidade de água $175\text{ kg}/\text{m}^3$, poderia se reduzir o teor de cimento de $350\text{ kg}/\text{m}^3$ para $307\text{kg}/\text{m}^3$. O mesmo cenário pode ser visto na França (1965 e 1989), onde os teores de C_3S passou de 42% para 58.4% e de C_2S diminuiu de 28% para 13% e; nos USA no qual a resistência passou, entre 1977 e 1991, de 37,8 MPa para 41,5 MPa conforme ASTM C 109-92 (ASTM C-1, 1993). No Rio de Janeiro (Brasil) na década de 50 (Figura 9), utilizaram em construções concreto armado de $f_{ck28} = 15\text{MPa}$, já na década de 60, observou-se a construção de pontes e viadutos em concreto protendido com $f_{ck28} = 24\text{ MPa}$ (THOMAZ, 2008). Nos dias atuais, estas pontes e viadutos precisariam de pelo menos 25 MPa para classe de agressividade I ou 40 MPa para classe de agressividade IV.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O Programa Experimental (Figura 10) consistiu na vistoria técnica com realizações de análise visual, ensaios não-destrutivos e coleta de pequenas amostras para análises químicas, físicas e microestruturais dos concretos retirados de três pontes distintas (com idades 93, 61 e 3 anos) conforme Tabela 6.

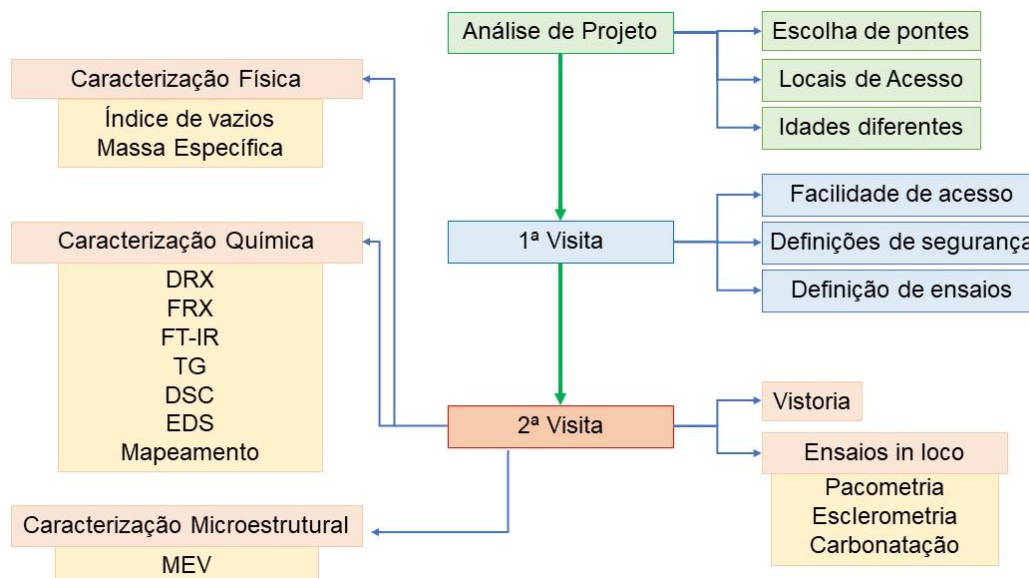


Figura 10-Fluxograma do programa experimental

Tabela 6 - Ensaio realizados nas estruturas e análises químicas do concreto

	Ensaio	P	V	B	L
Análise visual	NORMA DNIT 010/2004 – PRO, ABNT NBR 9452 (2019)	x	x	x	x
Ensaio não-destrutivos	Pacometria - ACI 228.2R-98 (1998)	x	x	x	x
	Esclerometria - ABNT NBR 7584 (2013)	x	x	x	x
	Carbonatação - DIN EN 14630 (2007)	x	x	x	
Caracterização dos concretos	Absorção - ABNT NBR 9778 (2009)	x	x	x	
	Análise de MEV	x	x	x	
	Análise DRX		x		
	Análise de FRX		x		
	Análise de FT-IR		x		
	Análise de TG		x		
	Análise de DSC- ASTM E 928-03 (2003)		x		

Legenda: P- Pilar, V - Viga, B - Bloco de Fundação, L – Laje

Estas pontes foram escolhidas em função da variação de idade e disponibilidade dos órgãos oficiais (DNIT, DER, Prefeituras), sendo sua localização aproximada expressa na Figura 11. Os materiais coletados nas pontes foram retirados em pequenos pedaços com martelo variando 5 a 6 cm para análises dos compostos em cada ponte, especificação dos agregados e

composição da pasta do concreto através de análises químicas, físicas e microestruturais. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos até serem analisadas.



Figura 11- Municípios metropolitano de Belo Horizonte
SkyscraperCity, (2019)

3.1 Obras de Arte Especiais selecionadas

As obras de arte estudadas são:

OAE-A: Ponte sobre o Rio das Velhas (Figura 12), localizada sobre o Rio das Velhas, Rodovia Municipal trecho da cidade de Rio Acima, com idade de 93 anos, com construção iniciada em 1923 e concluída em 1928, vide Figura 13. Dentre suas principais características, destacam-se: pista de rolamento única; extensão de 104,00 m e largura total de 5,00 m, em concreto armado revestida com pavimento asfáltico; superestrutura fragmentada em vãos de

dimensão igual a 16,00 m – 20,00 m – 20,00 m – 16,00 m, bem como há duas longarinas principais com altura de 1,20 m, ligadas por transversinas espaçadas de 2,00 m nos vãos extremos e 2,00 m nos vãos intermediários; mesoestrutura é constituída de encontros de concreto ciclópico nos extremos da ponte e nos apoios intermediários é composta por pilares de seção retangular constante de 0,60 m x 0,60 m, contraventados por uma viga (0,60 x 0,60 m) em sua extremidade inferior e outra viga (0,60 x 0,60 m) na extremidade superior; infraestrutura formada por blocos retangulares apoiados em estacas de madeira e, finalmente, a inclusão, após sua construção (em data não informada) de passarela metálica com largura de 1,20 m para uso de pedestre.

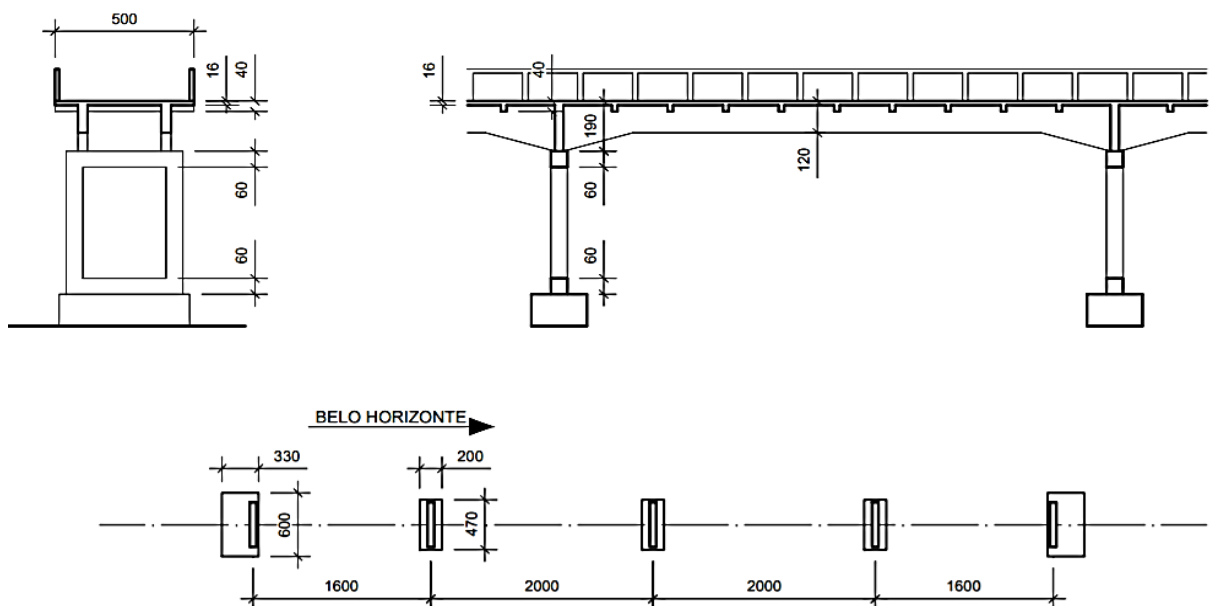


Figura 12- Planta da ponte de Rio Acima



Figura 13- Ponte sobre o rio das velhas rodovias Municipal trecho Rio Acima (2019)

OAE - B: Ponte Baronesa localizada sobre o Ribeirão Lajes construída, aproximadamente, em 1960, ou seja, possui 61 anos, na cidade de Santa Luzia- MG (Figura 14) possui extensão

de 40,50 m e largura total de 8,05 m, sendo que 7,05, em concreto armado revestida com pavimento asfáltico e o restante é destinado a passarela para pedestre. A superestrutura é composta por vãos 11,475 m, 15,550 m, 11,475 m, respectivamente, e balanço direito/ esquerdo igual a 1,00 m (Figura 15). A mesoestrutura é constituída de encontros nos extremos da ponte parede frontal de encontro de concreto armado, parede lateral de encontro de gabião e nos apoios intermediários é composta por pilares de seção retangular constante; Viga T ou I principal de concreto armado; Viga T ou I secundária de concreto armado, transversina de concreto armado ligada à laje (Laje superior de concreto armado). A infraestrutura é formada por bloco de concreto armado - fundação direta.

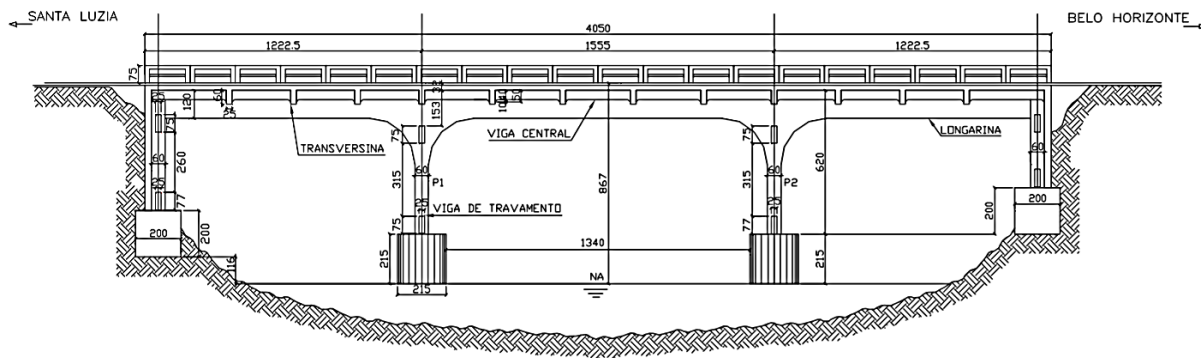


Figura 14- Planta da ponte do Ribeirão Lajes

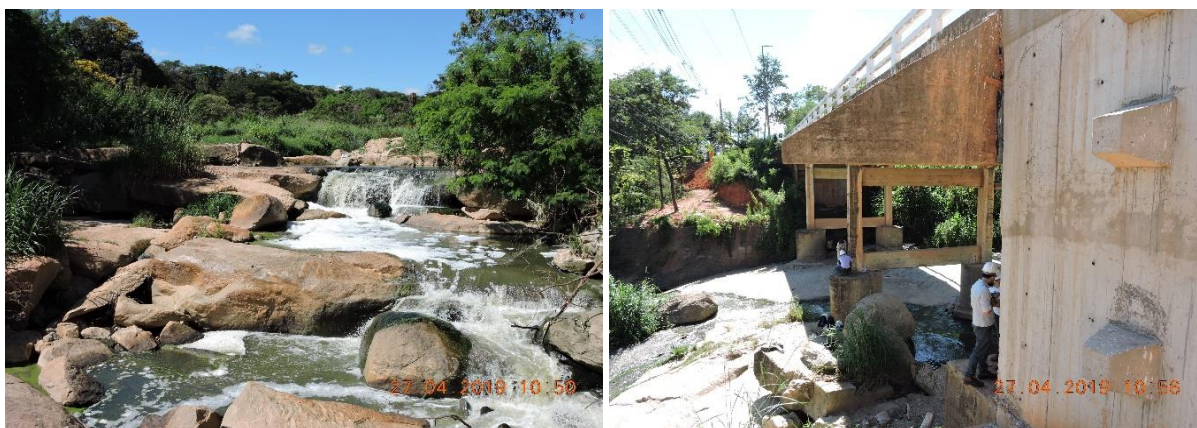


Figura 15- Ponte sobre o Ribeirão Lajes (2019)

OAE – C: Ponte Belo Vale, localizada sobre o Rio Paraopeba e inaugurada em 2018 (Figura 16 e Figura 17). Possui extensão igual a 112,18 m e largura total de 8,50 m, largura útil pista (m) igual a 7,30 m, sendo construída em concreto armado revestida com pavimento asfáltico; possui passeio/calçada para pedestres em concreto pré-fabricado com largura de 1,40 m. A mesoestrutura é constituída de encontros nos extremos da ponte e nos apoios

intermediários é composta por pilares de seção retangular constante; vigas pré-moldadas; transversina de concreto armado ligada à laje painel maciço. A infraestrutura é formada por blocos retangulares de coroamento. Os blocos são apoiados em estacas raiz.

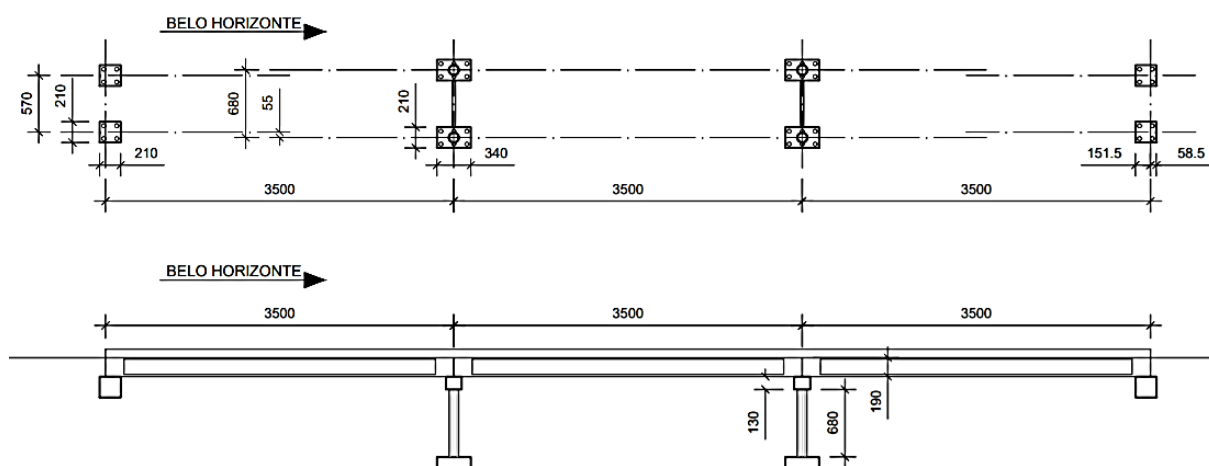


Figura 16- Planta Ponte sobre o Rio Paraopeba Belo Horizonte – Belo Vale



Figura 17- Ponte sobre o Rio Paraopeba Belo Horizonte – Belo Vale (2019)

3.2 Processo de vistoria

Foram realizadas vistorias nos concretos das três pontes, que consistiram em uma primeira visita na ponte do Rio Baronesa e na ponte Rio Acima no dia 14/04/2019 para avaliar as condições do entorno, a facilidade ou não de acesso e quais seriam os possíveis ensaios que poderiam ser realizados nas mesmas. A ponte de Belo Vale por ser mais distante, optou-se por fazer uma visualização por *Google Maps*, e alinhar com profissionais do DNIT, pois é uma construção recente com término de obra no final de 2018. De acordo com ACI 228.2R-13 (2018) as inspeções visuais podem oferecer ao investigador a identificação de origens e danos

causados nas estruturas com grandes riquezas de informações. É um dos métodos mais versáteis, mas sua eficiência depende do conhecimento e da expertise do investigador. Porém tem suas limitações de que apenas superfícies visíveis podem ser inspecionadas, defeitos internos passam despercebidos.

A vistoria seguiu as seguintes etapas:

- a) Realização de uma primeira vistoria visual para identificar todos os elementos das OAEs;
- b) Levantamento de toda a documentação pertinente acerca das informações básicas como: projetos, construção, condições ambientais e operação e manutenção das OAEs;
- c) Realização de análise crítica entre o documentado e o efetivamente realizado;
- d) Com base nas informações dos itens anteriores, definiu-se os equipamentos de segurança para a vistoria e materiais e equipamento demandados para a coleta de informações;
- e) Realização de análise visual de possíveis manifestações patológicas nos concretos, acrescido de ensaios não destrutivos e coleta de amostras seguindo o mesmo padrão de análises, a saber: na Obra B - 27/04/2019, Obra A - 02/05/2019 e Obra C - 23/05/2019.

3.3 Ensaios não-destrutivos/destrutivos

A análise da durabilidade de concretos foi aferida por ensaios não destrutivos devido ao impedimento de retirada de testemunhos. Os ensaios realizados foram (Figura 18):

- (a) Pacometria:** foi realizado para saber as distâncias; localizações; e diâmetros das armaduras nas estruturas já prontas, sem precisar destruir ou danificar quaisquer partes das estruturas. Foi utilizado o equipamento da Bosch wallscanner D-test 150 com objetivo de delimitar as armaduras nos quais poderiam sofrer interferências nas medições de resistência superficial da estrutura e o teste de Esclerometria da superfície.
- (b) Esclerometria:** foi utilizado o equipamento PROCEQ modelo Silver schmidt Type SH01-003-0374, seguindo a NBR 7584 (ABNT, 2013). Deve-se atentar que os resultados podem sofrer interferências de diversos fatores como: umidade na época da aferição, sendo em tempos úmidos a estrutura saturada apresenta resistências até 20% menores que em tempos secos; a dureza da superfície do concreto entre a cura; as condições de exposição do concreto (BUNGEY *et. al* 2006); a profundidade de carbonatação pode sobrevalorizar os índices esclerometricos; a esbeltez da peça ensaiada pode alterar o valor encontrado pelo deslocamento do martelo; a posição do ensaio, falhas no concreto dentre outros (ABNT NBR 7584: 2013). Segundo Mendes (2012) o tipo de agregado e de acordo com Trigo

(2012) a forma do agregado também pode influenciar (por isso os ensaios de caracterização).

- (c) Ensaio de carbonatação:** o primeiro passo foi selecionar os pontos em pilares e vigas a serem ensaiados. Optou-se por escolher pilares e vigas de forma aleatória, por estarem localizados em áreas de melhor acesso. Após a localização dos pontos a serem ensaiados, deu-se o início da execução do ensaio, retirando uma porção do concreto que ficava na superfície, realizando uma fratura recente e ortogonal à armadura não chegando à armadura. A superfície rompida foi limpa com um pincel para garantir a credibilidade dos resultados do ensaio e para evitar resíduos de pó em zonas indesejáveis. Realizou-se a aspersão do indicador de pH à base de fenolftaleína 1% Solução Alcoólica 1000 ml. Esperou-se alguns minutos, no qual a superfície sem cor este carbonatada com $\text{pH} < 9$, e a parte rosa não está carbonatada. Mensurou-se a profundidade de carbonatação com uso de um paquímetro de precisão 0,01 mm. Após ensaio a seção foi recomposta com graute.
- (d) Imagens de microscópio digital e câmera fotográfica:** foram feitas imagens com microscópios digitais com ampliação de 1000 vezes antes e após os ensaios. Tirou fotografias de todos os pontos analisados utilizando-se uma câmera Nikon Coopix P600 com zoom de 60x, extensível até 120x com o Dynamic Fine Zoom, está objetiva com ultrassom cobre desde 24-1440 mm e dispõe de vidro Super ED para uma melhor qualidade de imagem.



Figura 18- Ensaios Realizados Esclerometria, e Carbonatação.

3.4 Caracterização dos concretos

Utilizou-se a NBR 9778 (ABNT, 2009) para determinar a absorção de água, porosidade e massa específica das argamassas no estado endurecido. As amostras foram colocadas em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 72 horas, pesadas e mergulhas em água com temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por

um período de 72 horas. Decorrido este período, as amostras foram colocadas em um recipiente cheio de água no qual se inicia uma fervura 15 a 30 minutos, por 5 horas em ebulição. Segue-se com o resfriamento após a ebulição até atingir naturalmente a temperatura 21 a 25°C. Mede a massa submersa. São retiradas da água e secas com pano úmido e mede-se a massa saturada superfície seca. Os resultados podem ser calculados conforme equações 1 a 5.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (2)$$

$$\rho_s = \rho_w \cdot \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3)$$

$$\rho_{sat} = \rho_w \cdot \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

$$\rho_r = \rho_w \cdot \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (5)$$

Onde: A é a absorção de água por imersão (%);

I_v é o Índice de vazios (%);

ρ_w é a massa específica da água ($\approx 1 \text{ g/cm}^3$);

ρ_s é a massa específica da amostra seca (g/cm^3);

ρ_{sat} é a massa específica da amostra saturada (g/cm^3);

ρ_r é a massa específica real (g/cm^3);

m_{sat} é a amostra saturada em água após imersão e fervura (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_i é massa da amostra saturada imersa após fervura (g).

Os ensaios de caracterização química e mineralogia e as análises microestruturais foram:

- **Fluorescência de Raio x (FRX):** foi usado Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X WDS – Marca Philips/Panalytical – Modelo: PW-2404 – Tubo de Raios-X: anodo de Rh. Preparação de amostras: Fusão com fundente 65,0 % LiBO_2 – 34,0 % $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ – 1,0 % LiBr – 0,6000 g de amostra / 6,000 g de fundente – tempo de 15 minutos. A preparação das amostras para as análises químicas e fases minerais/hidratadas, consistiu em separar os agregados da pasta. Posteriormente estes foram pulverizados em um moinho de panela pneumático. Para os ensaios térmicos, elas passaram um por pré-aquecimento de 40°C por 24 horas em estufa. Buscou-se identificar os materiais utilizados na época das construções e possíveis agentes contaminantes presentes nas amostras. Foram utilizados os ensaios Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia no Infravermelho por

Transformada de Fourier (FT-IR), Análise termogravimétrica (TGA) e Análise calorimétrica diferencial (DSC):

- **Difração de Raio x (DRX):** foi realizada no equipamento Difratorômetro de raios-X (DRX) para amostras em pó Philips (Panalytical), sistema X'Pert-APD, controlador PW 3710/31, gerador PW 1830/40, goniômetro PW 3020/00, análise mineralógica semiquantitativa. As amostras seguiram os mesmos preparos do FRX. A definição e quantificação dos compostos foi realizada a partir do banco de dados de difração de Raios-X de pó existente no Powder Diffraction File (PDF), que é mantido e periodicamente atualizado pelo International Centre for Diffraction Data (ICDD).
- **Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FT-IR):** utilizou-se a técnica de transmissão com o uso de pastilhas de KBr. Foi gerado um pré-vácuo por 5 minutos (pressão de 70 KN), seguido pela leitura imediatamente por transmitância direta. Utilizou-se o equipamento FT-IR modelo Irapinity-1 da marca Shimadzu. Os intervalos de comprimentos de ondas estão expressos em 3460 a 460 cm^{-1} e a intensidade expressa em transmitância (%T).
- **Análises Térmicas:** realizou-se pela TGA (Thermogravimetric Analysis) e pela DTA (Differential Thermal Analysis), no equipamento DTG-60H Shimadzu, com cadinho de Alumina e atmosfera de nitrogênio 50 [ml/min-1] . A taxa de aquecimento foi $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$; variando entre 10 a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Realizou-se ainda a diferenciação calorimétrica (Differential Scanning Calorimetry - DSC) utilizando o equipamento DSC-60Plus Shimadzu, com o acessório de refrigeração RCS. O DSC Q1000, inicialmente foi calibrado, utilizando padrões de safira. Após, para a calibração da constante da célula do equipamento e da temperatura, foram utilizados padrões de índio e bismuto (materiais de referência rastreáveis certificados pelo NIST). As amostras foram analisadas em painéis de alumínio herméticas (TA Instruments).
- **Análises de microestrutura:** foram realizados no equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Jeol jsmit 300, atuando em alto vácuo. Estava acoplado a ele espectrômetro de energia (EDS) da marca Oxford sem nitrogênio líquido. As amostras dos pilares, vigas e blocos de fundação das três OAEs foram cortadas em cubos de 1 cm de lado. Foram metalizadas com ouro (camada de 195 \AA) e com carbono (camada de 195 \AA), conforme melhor análise do entorno entre o agregado e a pasta (devido ao efeito da carbonatação). As imagens de MEV foram obtidas em elétrons secundários na faixa de voltagem variando 10 KV e 20 KV e para EDS na voltagem de 20 KV .

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo reúne a apresentação dos resultados obtidos na vistoria *in loco* e das características dos concretos, assim como as análises.

4.1 Absorção de água, porosidade e massa específica

Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de absorção por imersão e porosidade (Figura 19) com base nos parâmetros definido por Helene (1993) (Tabela 7) é possível perceber que a porosidade e a absorção de água estão bastante elevadas em todas as OAEs.

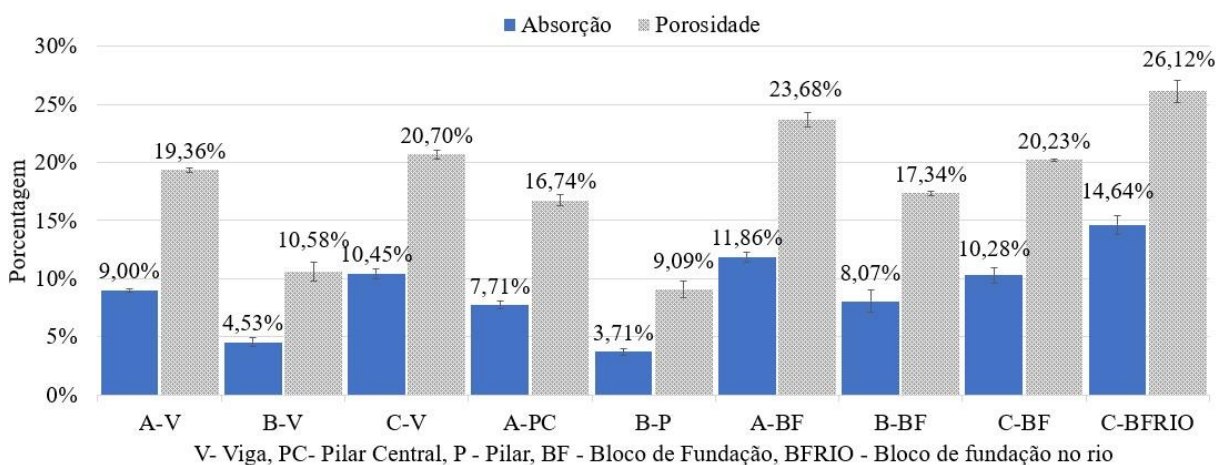


Figura 19- Resultado do coeficiente de absorção e porosidade.

Tabela 7 – Critério para avaliar a porosidade em relação à qualidade do concreto.

Qualidade do concreto	Porosidade (%)	Absorção de água (%)
Deficiente	≥ 15	> 6,3
Normal	10 a 15	4,2 a 6,3
Durável	≤ 10	< 4,2

Fonte: Helene, 1993.

Percebe-se que os valores da porosidade variam de acordo com os elementos estruturais e suas localizações nas obras A, B e C, ou seja, estão: diretamente, sazonalmente ou afastados em relação ao contato com a água dos rios. Estas águas possuem grande quantidade de agentes agressivos, pois recebem esgotamentos sanitários de vários lugares a montante da obra de arte. A obra A (mais antiga) obteve uma porosidade na viga (19,36 % - visualizado no MEV da Figura 47), similar a obra C (20,70 %). De acordo com o a Tabela 7 com a parametrização de Helene (1993), a porosidade e absorção de água encontram-se na mesma proporção caracterizando o concreto como deficiente quanto a qualidade. Já na obra B, constatou-se o valor de

10,58% de porosidade e 4,53% para absorção, logo um valor intermediário para a qualidade do concreto. Nos pilares, obra A está na classe deficiente, enquanto a obra B permanece normal. Nos blocos de fundação, notoriamente as três obras estão classificadas como deficientes de acordo com a variação da absorção (8,07% a 14,64 %) e da porosidade (17,34% a 26,12 %), promovendo indícios de ser um concreto que utilizou maior relação a/c e um controle de produção mais deficitário.

4.2 Carbonatação

Sabe-se que vários fatores podem influenciar no processo de carbonatação do concreto, incluindo as condições ambientais, umidade relativa, concentração de CO₂ e temperatura (FELIX *et al.*, 2021; WITKOWSKI e KONIORCZYK, 2020, CASCUDO *et al.*, 2021; RAMACHANDRAN *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020). A carbonatação é um processo físico-químico que ocorre entre compostos hidratados do concreto e o CO₂, diminuindo a alcalinidade do concreto e deixando a armaduras mais vulneráveis à corrosão (BROOMFIELD, 2007). Diante disto, estruturou-se a Tabela 8 e 9, de forma resumida, as comparações de possíveis fatores influenciadores na carbonatação das obras A, B e C.

Tabela 8 - Condições de exposição das Pontes nas Obras A, B e C.

OEA	Veículos	População	CO ₂ - 2019 (Toneladas)
A	4.738	10.420	4.160.083
B	87.943	220.444	
C	4.216	7.719	

Fonte: IBGE, 2018a, IBGE, 2018b, IBGE, 2018c, IBGE, 2020a, IBGE 2020b, IBGE, 2020c e 5º Inventário Municipal de Emissões de GEE Relatório Técnico de atualização e extração dos dados (2020).

Pelos resultados da carbonatação na Obra A (Figura 20), observa-se que o bloco de fundação - BFR1 e o Pilar do rio - PR2 não apresentaram a sua região carbonatada. Este bloco e pilar estão em contato com o rio e próximos ao fluxo de água. Não foram visualizadas trincas e fissuras no bloco. O BFR1 foi o elemento que apresentou maior porosidade dos elementos analisados na ponte (23,68%), entretanto não apresentou uma região carbonatada, o que pode ser devido a sua estrutura está em contato direto com o rio, os poros serem isolados e não apresentando fissuras e trincas (LIU; YU e CHEN, 2020; ANN *et al.*, 2010).

A viga de transição (VT3) mostrou baixa inserção de carbonatação, sendo o valor máximo obtido de 15,04 mm. A viga não se encontra próximo do rio, entretanto demonstrou

algumas fissuras e trincas, o que pode ter facilitado a entrada da carbonatação, mesmo que de forma lenta (SHI *et al.*, 2020). Um outro fator que pode ter influenciado para que o ingresso da carbonatação seja baixa, é a porosidade e o fator a/c do concreto (MAGALHÃES *et al.*, 2017) que tende ser menor nos elementos da superestrutura. Tem-se uma quantidade baixa de veículos e da população local, fazendo com que o processo de carbonatação seja lento (Tabela 8).

Tabela 9– Comparação de fatores na carbonatação na Ponte/OBRA A, B e C

OAEs	Dados	P	A	a/c	PR	CR	F	C (mm)	E (MPa)
A	BFR1	23,68	11.86	-	S	S	N	0,00	51.4
	VT3	-	-	-	N	N	S	15,04	-
	V2	19,36	9.00	-	S	N	S	50,00	-
	VL4	-	-	-	S	N	S	50,00	26.5
	PR2	16,74	7.71	-	S	S	N	0,00	61.2
B	BFC1	17,34	8,07	-	S	N	N	13,72	-
	BFR2	-	-	-	-	S	N	50,00	47.1
	BFC3	17,34	8,07	-	S	N	N	15,07	-
	VLC1	-	-	-	-	S	N	4,94	61.1
	VLR2	-	-	-	-	S	N	4,07	52.8
	VLR3	10.58	4.53	-	S	S	-	8,61	51,1
	PBFR1	9,09	3,71	-	-	S	-	50,00	56.5
C1	-	-	-	-	N	-	3,12	58.6	
C	BFC1	20.23	10.28	0,6	N	N	N	4,50	40.5
	BFC2	20.23	10.28	0,6	N	N	N	0,88	45.4
	BFR3	-	-	0,6	-	S	N	2,46	43.1
	BFR4	26,12	14,64	0,6	-	S	N	50,00	45.7
	VLC1	20,70	10,45	0,45	-	N	N	5,15	32.0

P - Porosidade, A - Absorção, PR - Perto do Rio, CR - Contato com o Rio, F - Fissuras, C - carbonatação, E - Esclerometria

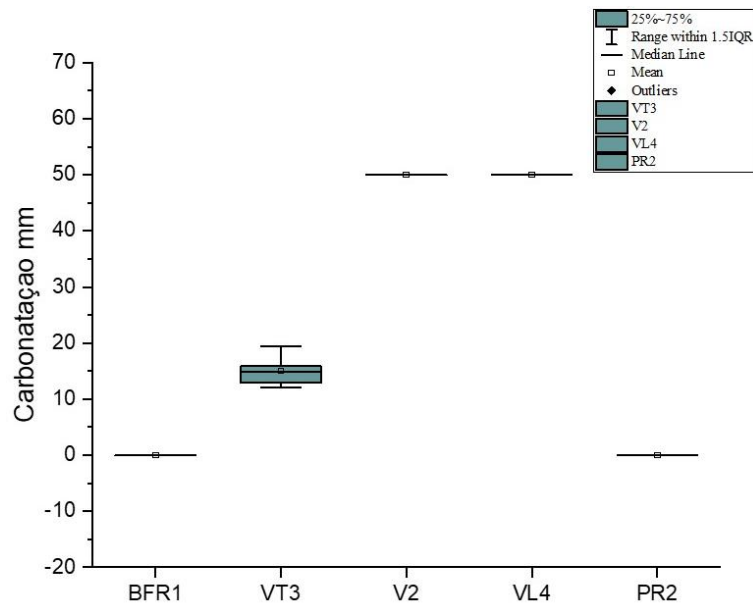


Figura 20-Resultados de carbonatação da OBRA/A.

BF – Bloco de fundação; V – Viga; P – Pilar; C – Cortina; L- Laje; R- rio.

Em contrapartida a viga V2 e a viga lateral VL4 (Figura 20) apresentaram valores de 50,00 mm (toda a espessura testada está carbonatada, logo este valor pode ser maior) de penetração de carbonatação no concreto. Outro ponto importante, é que a V2 e VL4 não estavam próximas do rio. Resultado gerado pela presença de fissuras e trincas (ANN *et al.*, 2010) e a elevada porosidade (19,36% - menor que BFR1) do concreto, que facilitaram o acesso da água e dióxido de carbono potencializando o processo de carbonatação. Pelas imagens com microscópio digital (Figura 21 a, b) do pilar do centro (PR2), constata-se que após aspergidas com fenolftaleína a região analisada estava preservada - sem carbonatação. Já na viga lateral (Figura 21c, d), observa-se trincas, o que corrobora com a entrada de agentes agressivos como é perceptível na Figura 20, demonstrando que está completamente carbonatado.

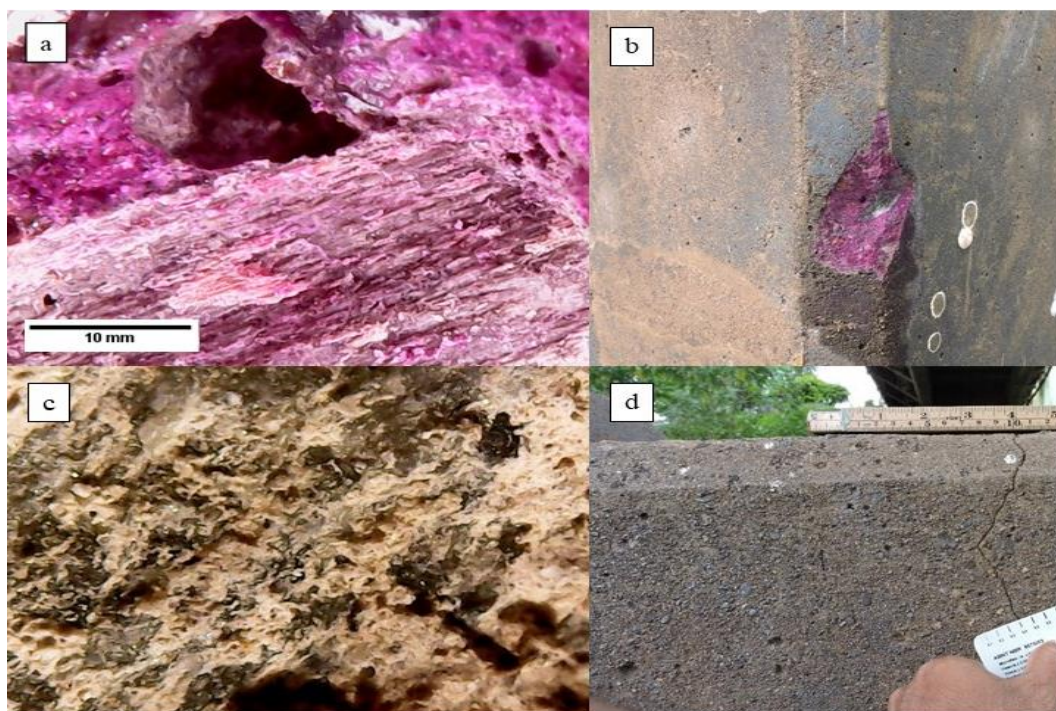
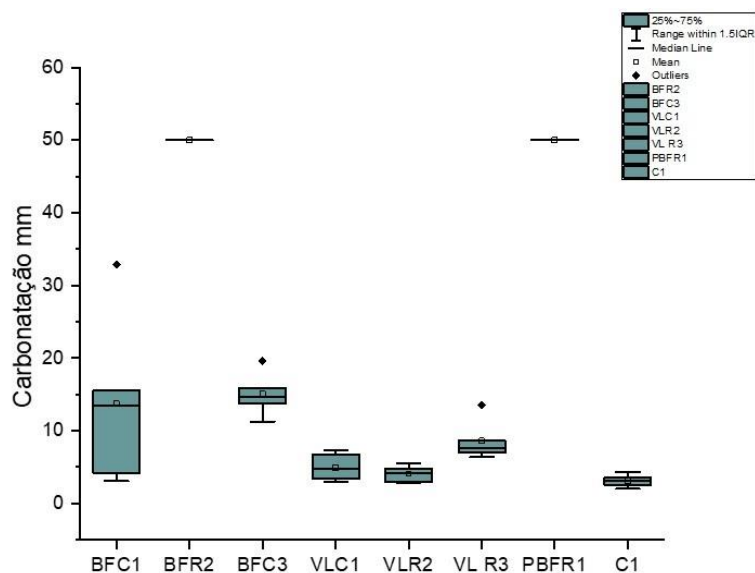


Figura 21– Obra A, Pilar do centro, (a) foto da lupa, (b) foto normal, Viga lateral, (c) foto da lupa (VL4), (d) foto normal do pilar

Evidencia-se na obra B (Figura 22) que os blocos de coroamento de fundação - BFC1 e BFC3 apresentaram região carbonatada, sendo que os valores máximos 32,93mm e 19,51mm, respectivamente. Ambos estavam perto do rio e apresentaram porosidade de 17,34%, logo o fator que pode ter influenciado é o período que cada bloco, fica submerso no rio. O que é corroborado por BFR2 que é o bloco de fundação que fica no rio e pilar do bloco de fundação no rio - PBFR1 (em função das chuvas, tem períodos que fica submerso), apresentado toda região de teste carbonatada, atingindo valor máximo de penetração (50,00mm). A sua porosidade foi

de 9,09 %, ficando em um ambiente úmido o que pode ser uma condição para uma maior inserção de carbonatação (ANN *et al.*, 2010).



BF – Bloco de fundação; V – Viga de ligação; P – Pilar; C – Cortina; R- rio.
 Figura 22- Resultados de carbonatação da OBRA/ B.

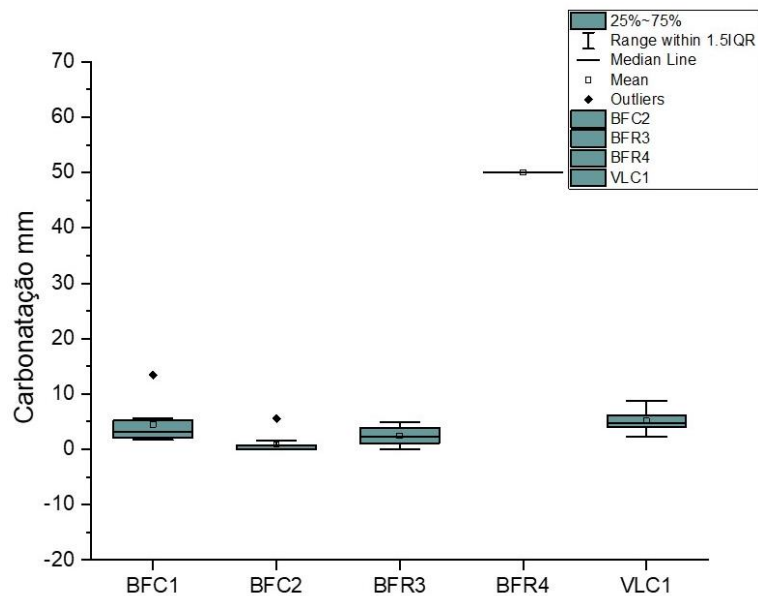
A viga VLC1 apresentou região carbonatada com valor máximo de 7,39 mm de penetração, sendo este valor baixo. Esta viga não se encontra perto do rio e não manifestou trincas e fissuras. Já as vigas que se localizam no rio como a VLR2 (Figura 23) e VLR3 apresentaram carbonatação em suas estruturas, com valores máximos de 5,53mm e 13,50mm, respectivamente, sendo considerados também baixos, mesmo estando em contato com o rio. Diante disto, e comparando com os valores da cortina C1 (4,34mm) que também não está próxima do rio, tem-se que estes resultados foram influenciados pela porosidade, tipo e quantidade de cimento (geralmente maior nos elementos de superestrutura) e as poucas fissuras e trincas presentes.

Um aspecto importante a destacar é que uma obra antiga, 61 anos, assim sendo, não apresentando registros sobre o fator a/c e tipo de cimento utilizado para a sua construção (Tabela 9). A população estimada para o ano de 2020 é de 220.444 habitantes (IBGE, 2020b) e o número de veículos na cidade de Santa Luzia, no ano de 2018 era estimado em 87.943 (IBGE, 2018b). Logo a agressividade desta ponte tende a ser maior do que a Obra A, todavia as causas que parecem ter influenciado mais na carbonatação são a porosidade e o período que estes elementos ficam submerso no rio.



Figura 23 - Obra B bloco de fundação de coroamento (BFC1), (a) foto da lupa, (b) foto normal, Viga de ligação do rio (VLR2), (c) foto da lupa, (d) foto normal.

Na obra C (Figura 24), o bloco de fundação da cortina BFC1 (Figura 25) apresentou baixa profundidade de penetração (máximo de 13,41mm). Essa baixa carbonatação, pode ser devido a pouca incidência de CO_2 por ser um ambiente rural e pouco fluxo de veículos e por ser uma obra recentemente construída, contudo a porosidade do concreto, ao fator a/c de 0,60 ser alto (de acordo com ABNT NBR 6118: 2014), o que aceleraria o processo de carbonatação (CHEN *et al.*, 2021, WITKOWSKI e KONIORCZYK, 2020). Isto é corroborado pelos resultados dos blocos de fundação da cortina (BFC2) e de fundação de pilares (BFR3) que apresentaram valores máximos de 5,56mm e 4,94mm, respectivamente, sendo menor que a profundidade de BFC1. Considerando que eles também tiveram fator de a/c 0,60 (conforme projeto) e que possivelmente apresentaram porosidades semelhantes às da BFC1. Um ponto a ser destacado, é que em ambos os blocos não foram detectadas fissuras e trincas. Entretanto o bloco de fundação que fica dentro do rio (BFR4) apresentou a sua região toda carbonatada, sendo este no valor de 50,00mm. Considerando que ambos foram utilizados o mesmo fator de a/c 0,60, e que também estavam em contato direto com a água do rio e não apresentaram fissuras e trincas. Os motivos que podem ter influenciado seriam a porosidade, os períodos que cada bloco fica submerso no rio e alguma possível alteração nos processos de execução.



BF – Bloco de fundação; VL – Viga ligação; C – Cortina; R- rio.

Figura 24- Resultados de carbonatação da OBRA/PONTE C

Identificou-se baixa (máximo de 8,81mm) penetração de carbonatação na viga de ligação do bloco (VLC1) (Figura 25). Esta viga não está nas mesmas condições, que a BRF3 e BRF4 (os quais estão inseridos no rio), não apresenta fissuras e fator a/c é inferior (0,45) aos blocos, contudo apresentou um índice de carbonatação intermediário ao de BFR3 e BRF4. A ponte é recente (3 anos de idade), a população estimada para o ano de 2020 é de 7.719 habitantes (IBGE, 2020c) e o número de veículos na cidade de Belo Vale, no ano de 2018 era estimado em 4.216 (IBGE, 2018c), logo a população local e a frota de veículos são relativamente baixas. Assim, pela Tabela 8, constata-se que as razões que podem influenciar diretamente no processo de carbonatação dos elementos VLC1 da Ponte/OBRA C são a porosidade em relação aos blocos de fundação (BFC1 e BFC2 – 20.23%) e o menor fator de a/c ($0,45 < 0,60$).

Pela Tabela 9, percebe-se ainda, uma tendência nas médias de penetração de carbonatação nos elementos de cada obra em relação a idade: VT3-Obra A, VLC1-obra B e VLC1-Obra C. É possível observar que a VT3 da ponte A teve o maior índice de carbonatação, o que pode ser devido a ponte ser mais antiga (93 anos de idade), mas teve uma população bem próxima da obra C. Todavia o VLC1-Ponte B, teve um valor menor do que a VLC1- Ponte C, mesmo a obra B tendo a idade de 61 anos contra 3 anos (Obra C), e uma população 60 vezes maior do que a população da obra C. Similarmente correlacionando BFR2-obra B com os BFR3 e BFR4 da obra C, constata-se que o BFR2 e BFR4 apresentaram máxima carbonatação (50,00mm) aferida. Entretanto a ponte C tem apenas 3 anos e a menor população das três pontes, assim a idade das pontes e a sua população local, não podem ser considerados como um motivo

determinante para a carbonatação do concreto. Comprovado pela análise dos elementos da mesma obra C (BFR3 e BFR4), no qual um apresentou o valor de 50,00mm e o outro um valor bem inferior, 2,46mm, estando em situações bem semelhantes. Logo, fatores como exposição, cuidado na execução, especificação e uso de materiais adequados também são primordiais e devem ter gerado está expressiva variação na carbonatação.



Figura 25- Bloco de fundação cortina da obra C, (a) foto da lupa, (b) foto normal, Viga de ligação, (c) foto da lupa, (d) foto normal.

De acordo com Metha e Monteiro (1994), Neville (1997) e Helene (1993), os cimentos sem adições de pozolanas e escórias apresentam maiores resistências à carbonatação em relação aos cimentos com adições atuais. Assim, pode-se destacar na obra A com 93 anos, que deve ter utilizado cimento CPI, a identificação de alguns elementos estruturais conservados, não apresentando carbonatação. Nas obras B e C, nos quais já foram utilizados cimentos com adições e com grãos de maior área superficial e que, devido a poucos cuidados com cura, geraram maior hidratação nas primeiras idades com elevação calor de hidratação e causaram fissuração (ou microfissuração) ampliando a celeridade da profundidade a carbonatação dos concretos.

Analisando as Figura 26, 27 e 28 e as Tabelas 10 e 11, verifica-se que a obra A, construído em 1928 apresenta: alto índice de carbonatação, lajes e longarinas com armadura exposta e descamação do concreto (Figura 27) devido aos produtos de corrosão. Desde 2003, a

padronização brasileira (PHILLIPSON *et al.*, 2016) apresenta a espessura do cobrimento mínimo para concreto armado em função da agressividade ambiental, sendo adotado no mínimo 25 mm para estruturas de concreto armado. A obra B está localizada em uma região urbana, caracterizada por alto tráfego de carros; apresenta alta carbonatação (Tabela 11), sendo a corrosão das armaduras evidenciada principalmente nos pilares da ponte. Já na Obra C, que é a mais nova (3 anos), apresenta baixo nível de defeitos e atende aos requisitos da atual padronização brasileira, contudo evidencia-se a importância dos serviços de manutenção preventiva para garantir a vida útil destas obras de arte.



Figura 26- Ensaio de carbonatação nas OAEs



Figura 27-Cobrimento das armaduras nas OAE – A



Figura 28-Manifestações patológicas: OAE - B

Tabela 10 - Resultado do ensaio de carbonatação – identificação do grau de carbonatação.

OAEs	A	B	C
Pilar	XX	XX	X
Viga	XXX	X	X
Viga de fundação	XXX	XX	XX
Blocos de fundação	XXX	XXX	XX

X (pouco); XX (médio); XXX (todo comprometido)

Tabela 11 - Espessura de cobrimentos das armaduras.

OAEs	A	B	C
Pilar	-	XX	-
Viga	XXX	XXX	X
Laje	XXX	-	-

- (adequado); X (pouco); XX (médio); XXX (insuficiente)

No que diz respeito à corrosão das armaduras, é importante ressaltar o aumento das taxas de CO₂ ocasionadas pelo efeito estufa, que tende a alterar negativamente a agressividade ambiental (PENG e STEWART,2014; STEWARTe WANG,2012 e OLIVEIRA,2017), bem como por etapas de produção de concreto defeituosas, que podem resultar em vazios, Figura 27, 28 e 29 (ABNT NBR 6118, 2014, VÖLKER e SHOKOUHI,2015 e HELLEBOIS *et al.*,2013). Foram vários pontos de corrosão do aço nas pontes A e B, nos elementos: pilares, vigas, lajes que são críticas e podem levar ao colapso da estrutura, caso os reparos não sejam realizados. Portanto, na obra A está fechada por falta de segurança. Na face inferior do painel central existem armaduras expostas (Figura 27 e 28) nas lajes, junto aos ralos, que possuem comprimento insuficiente para a adequada condução das águas pluviais. O tabuleiro possui uma junta transversal intermediária que, no entanto, não possui dispositivos de vedação de borracha, permitindo a livre percolação da água e conseqüente deterioração do concreto e do aço (Figura 29).



Figura 29-Manifestação patológica: OAE – C

Em síntese, pode-se enfatizar que para o caso da obra A os elementos estruturais que estão em contato com água (bloco de fundação - BFR1 e o Pilar - PR2) não há carbonatação e nem presença de fissuras devido a saturação do concreto. Entretanto, a viga V2 apresenta-se com toda a espessura de cobrimento da armadura comprometida, incluindo a presença de fissuras e trincas. Para obra B os blocos de coroamento de fundação - BFC1, BFC3 e BFR2 possuem elevada porosidade e apresentam espessura carbonatada mediana. Destaca-se que uma obra antiga, 60 anos e situa-se numa região com maior número de habitantes e trânsito de veículos, o que possibilita um incremento na agressividade ambiental e condições propícias para comprometer a durabilidade da estrutura de concreto armado face às exigências normativas da época da sua concepção. Para obra C, os blocos de fundação apresentaram espessura carbonatada média a baixa, estando associada as novas exigências da normalização brasileira no que se refere ao fator água/cimento e agressividade ambiental. Um ponto a ser destacado, é que em ambos os blocos não foram detectadas fissuras e trincas e ficavam dentro do rio, mas teve um que apresentou a sua região toda carbonatada (50,00mm). Assim, os motivos que podem ter influenciado seriam associados a possível alteração nos processos de execução.

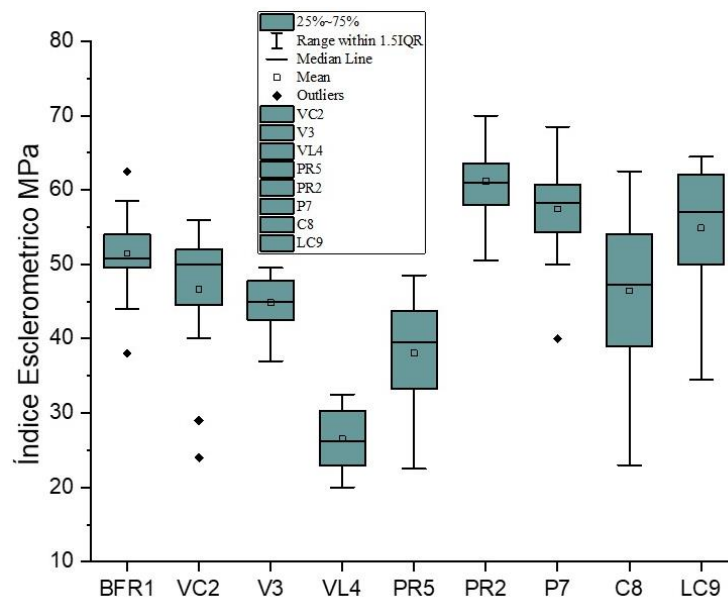
4.3 Índice Esclerométrico

Nos projetos das devidas OAEs, disponibilizados pelo DNIT, constatou-se que as obras A e B não dispunham de informações sobre resistências das estruturas, trem Tipo ou fator a/c, tendo somente especificações das armaduras e local de utilização. O concreto utilizado na época seguia as especificações das normas (NB-1,1940 e NB-1,1960), o fator a/c dependia das condições peculiares de cada obra e da resistência que era pretendida. Na obra C, que já foi concebida com as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014), sendo preconizados no projeto as resistências de acordo com a Tabela 12 e um concreto de regularização de $f_{ck} > 9$ MPa, cargas moveis conforme o trem Tipo TB45 (NBR-7188, 2013), módulo de elasticidade transversal do aparelho de Apoio igual 1,0 MPa com uma carga admissível de 15,0 MPa. Ao definirem os pontos foram realizados ensaios de pacometria para localização das armaduras, para que não houvesse influência destas nos resultados de esclerometria.

Tabela 12 – Classe de Resistencia do Concreto.

Legislação	Resistência	Relação a/c
NB -1 (1940)	12,5 MPa	-
NB -1 (1960)	13,5 MPa	-
NBR - 6118 (2014)	Infraestrutura $f_{ck} \geq 25$ MPa	0,60
	Mesoestrutura $f_{ck} \geq 25$ MPa	0,55
	Superestrutura $f_{ck} \geq 35$	0,45

A variação de resistência pode ser devido a diversos fatores, como: porosidade, umidade, carbonatação, temperatura elevada, sendo o resultado do ensaio fortemente dependente da densidade dos agregados e da adsorção de água (SINGH, 2018; POORARBABI, *et al.*, 2020). Na obra A (Figura 30 e 31), observou-se que os elementos estruturais posicionados no rio, como bloco de fundação BFR1, apresentaram uma resistência superficial média de 51,4 MPa e os pilares PR5 e PR2 mostraram valores médios de 38,1MPa e 61,2MPa, respectivamente. Estes estão sujeitos a uma maior variação do intemperismo, umidade e carbonatação, que tendem influenciar nos resultados da dureza superficial (ŠAVIJA e LUKOVIĆ, 2016; SZILÁGYI; BOROSNYÓI; ZSIGOVICS, 2011). Quanto as vigas que estão próximo ao rio e estão sujeitos ao mesmo tipo de dano ou deterioração do concreto, observou-se resultados parecidos, como por exemplo, na viga cortina VC2 (Figura 32) que apresentou uma média de 46,6 MPa e a viga V3 com resistência de 44,8 MPa. Todavia, alguns elementos como os pilares PR5 e PR2 exibiram uma diferença muito grande entre as suas resistências superficiais. Isto pode ser devido ao tempo que cada elemento fica submerso na água do rio. Sendo menor em PR5 que está mais próximo do rio, e maior em PR2 que se encontra em uma altura superior, passando por menos ciclos de molhagem e estando mais exposto ao CO₂. Já nas vigas V3 (44,8 MPa) e VL4 (26,5MPa) observou-se grande diferença entre os seus valores de resistência superficial, podendo ser devido a exposições diferentes (extremidades opostas - Figura 31).



BF – Bloco de fundação; V – Viga; P – Pilar; C – Cortina; L- Laje; R- rio.

Figura 30- Resultados de Esclerometria da OBRA/A

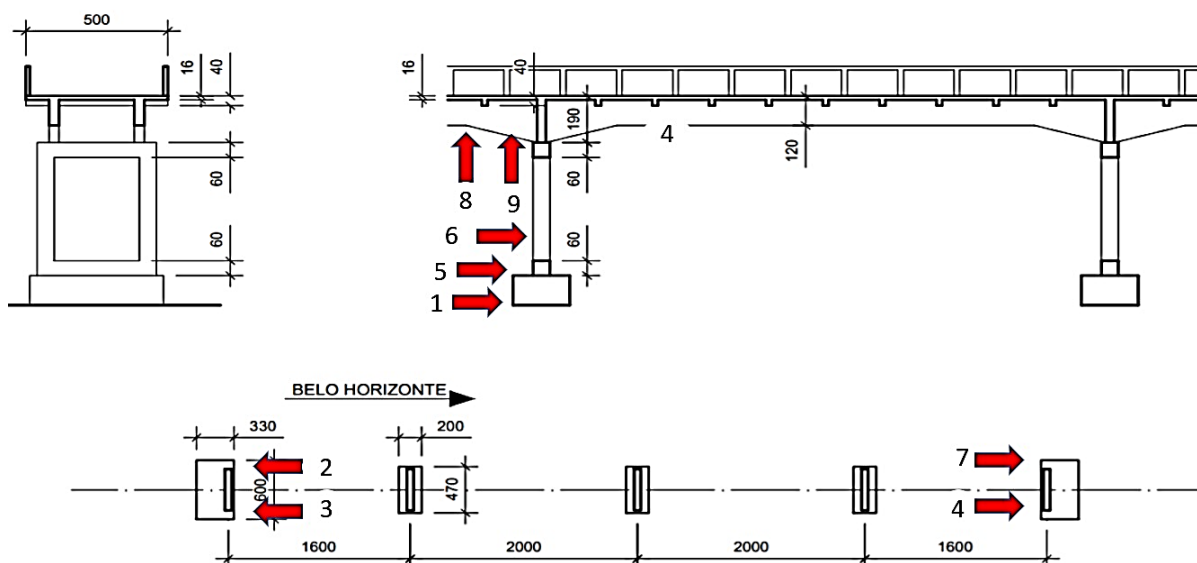


Figura 31- Pontos dos ensaios de esclerometria da OBRA/A

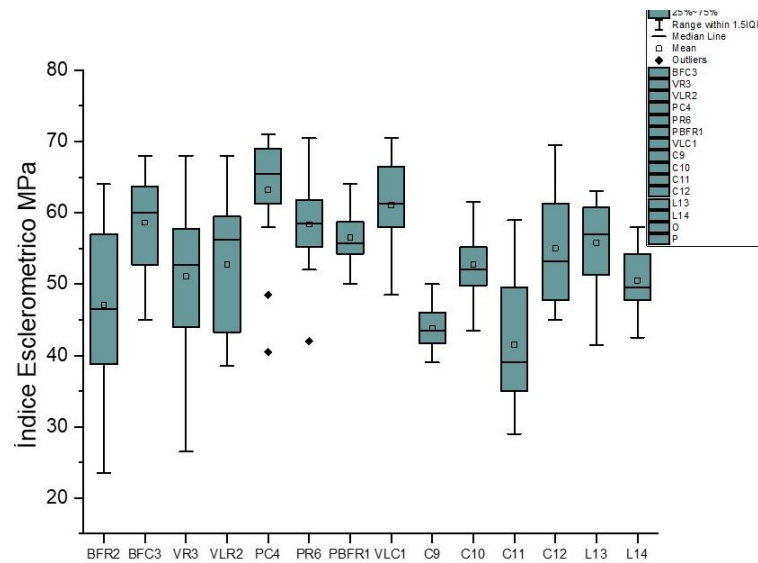
Na laje cortina LC9 (Figura 32) foi relatado um incêndio na parte inferior, podendo este ter agravado as condições de resistência do elemento, contudo o resultado de resistência superficial média foi de 54,9MPa, logo um valor alto de resistência. Este pode ser em consequência da penetração do CO₂, aumentando a carbonatação nesta região e influenciando a dureza e a resistência superficial.



Figura 32 - OBRA/A, Viga da cortina 2VC (a) e Laje da cortina 9LC (b)

Os resultados de esclerometria na obra B (Figura 33 e 34) demonstram que a média dos valores da resistência superficial dos elementos foram: 47,1 MPa para o BFR2, 51,1 MPa para o VR3, 52,8 MPa para o VLR2, 58,3 MPa para o PR6, 56,5 MPa para o PBFR1, 58,6 MPa para o BFC3. Os pilares que estão próximos do rio apresentaram valores inferiores do pilar da cortina PC4 (63,2MPa), que não está em contato direto com o rio. Assim sendo, o contato com o rio,

pode influenciar na resistência superficial, como a umidade, porosidade, carbonatação e agentes agressivos provindo dos esgotos.



BF – Bloco de fundação; V – Viga; P – Pilar; C – Cortina; L- Laje; R- rio.

Figura 33-Resultados de esclerometria da OBRA/B.

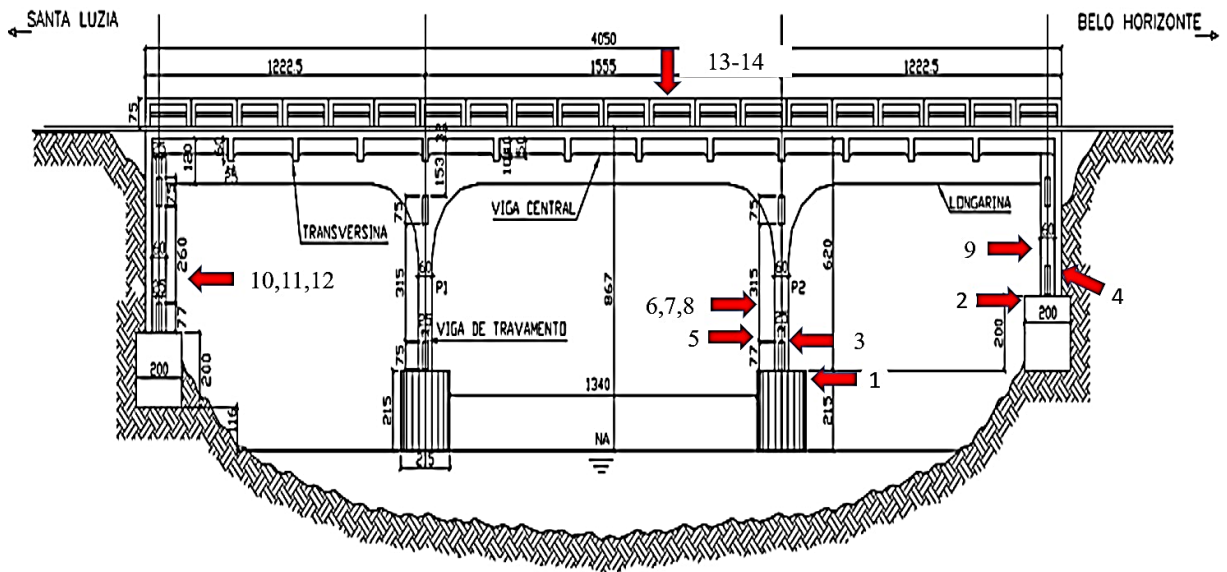


Figura 34 - Pontos dos ensaios de esclerometria da OBRA/B

Analisando os elementos próximos do rio, como a viga da cortina VLC1 (61,1 MPa) e a cortina C9 (43,8MPa), que estão na mesma extremidade da ponte, percebe-se uma diferença expressiva. Isto ocorre, uma vez que em determinadas épocas do ano, como tempo chuvoso, a cortina pode ter contato com o rio. Entretanto, os elementos da cortina da outra extremidade, C10 (52,8 MPa), C11 (41,5 MPa) e C12 (55,0 MPa) apresentaram uma grande variação nos seus valores. Os fatores que podem ter influenciado, seria o tempo de exposição a intempéries

diferenciado, uma vez que estavam em uma região com menos incidência de raios solares, protegidos de ações da chuva e não ter contato direto com o rio (Figura 35).



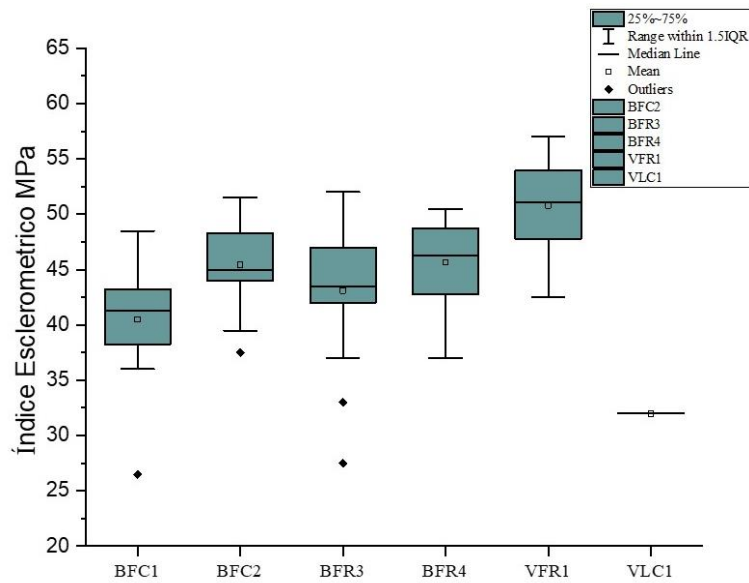
Figura 35- OBRA/B, Pilar no Rio PR6 (a) e Cortina 9C (b)

As lajes 13L e 14L, apresentaram resultados da resistência superficial, 55,8MPa para a 13L e 50,5 MPa para a 14L. Logo, valores altos, mesmo estando em ambientes mais agressivos ao concreto, como: fluxo de água torrencial, temperatura elevadas, variação de umidade e vibrações devido ao fluxo de carros. Tem-se que a resistência superficial aumentada pode ser devido ao processo de carbonatação adiantado destes elementos.

Na obra C (Figura 36 e 37), foram realizados ensaios na mesoestrutura, cortinas dos blocos de fundação. As leituras realizadas mais próximas do leito do rio deram uma resistência superficial maior, variando de 26,5 a 51,5 MPa (devido a umidade está presente e já adquirido uma resistência superficial maior devido a carbonatação). A média dos valores da resistência superficial para os blocos de coroamento da fundação fora do rio, foram: 40,5MPa para o BFC1 e 45,4 MPa para o BFC2. Os blocos de coroamento não apresentaram uma grande variação entre eles, podendo ser esta variação devido a erros na etapa de execução e fatores como a carbonatação. Para os blocos de fundação que estão no rio, o valor médio da resistência superficial encontrados são: 43,1MPa para o BFR3 e 45,7MPa para o BFR4, mostrando uma pequena variação entre eles, que pode ser devido ao processo de carbonatação.

Portanto, mesmo os blocos que estão no rio e os blocos de coroamento que não estão em contato direto com o rio, apresentaram a resistência superficial bem próximos. Assim sendo, podendo observar que o contato direto com o rio, pelo menos em poucos anos, não é o fator determinante para influenciar na resistência superficial. A viga do rio, VFR1, apresentou a média de resistência superficial de 51,1MPa e a viga de ligação do coroamento, VLC1, exibiu a

média de resistência superficial de 32,0 MPa. Destaca-se que ACI 228 1R-89 (1989) menciona que uma superfície carbonatada possui índices e esclerométricos maiores do que os correspondentes às camadas internas do elemento estrutural. Como visto no lado Belo Horizonte/Belo Vale desta ponte, no qual a resistência superficial manteve constante em 32,0 MPa. Sua localização fica mais distante do leito do rio. Nos dois lugares as resistências estimadas foram maiores que previstas nos projetos ($f_{ck} \geq 25$ MPa) destacando o feito da carbonatação.



BF – Bloco de fundação; V – Viga; ; C – Cortina; R- rio.

Figura 36- Resultados de Esclerometria da OBRA/C

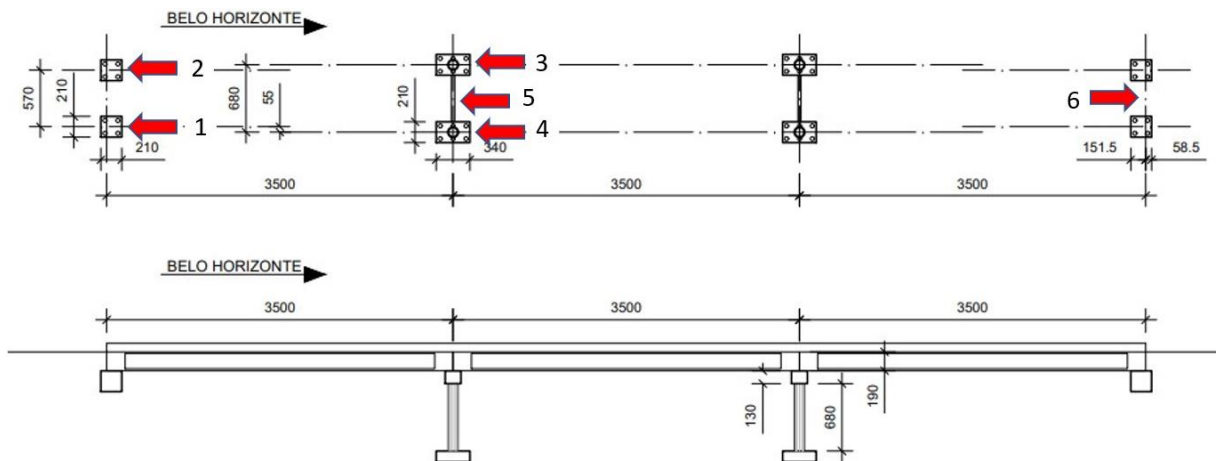


Figura 37- Pontos dos ensaios de esclerometria da OBRA/C

Analisando os dados na Tabela 13, que compara os dados de porosidade, carbonatação e esclerometria, observa-se que a profundidade da carbonatação interfere na dureza do concreto, sendo que a dureza irá aumentar à medida que a carbonatação avance (KUMAVAT, *et al*,

2021). Pode-se observar que na obra A, os elementos que tiveram a menor carbonatação PR2 e BFR1 apresentaram a maior resistência superficial, logo a presença de umidade impactou no aumentando a resistência superficial do concreto (KAZEMI, *et al*, 2019; KOVLER, *et al*, 2018).

Tabela 13 –Comparação de fatores de porosidade, carbonatação e esclerometria nas OBRA /A, B, C.

Obras	Dados	Porosidade (%)	Absorção (%)	Média carbonatação (mm)	Média Esclerometria (MPa)
A	VL4	-		50,00	26,5
	PR2	16,74	7,71	0,00	61,2
	BFR1	23,68	11,86	0,00	51,4
B	BFR2	-	-	50,00	47,1
	VLC1	-	-	4,94	61,1
	VLR2	-		4,07	52,8
	VR3/VLR3	10,58	4,53	8,61	51,1
	PBFR1	9,09	3,71	50,00	56,5
	BFC3	17,34	8,07	15,07	58,6
C	BFC1	20,23	10,23	4,50	40,5
	BFC2	20,23	10,23	0,88	45,4
	BFR3	-		2,46	43,1
	BFR4	26,12	14,64	50,00	45,7
	VLC1	20,70	10,45	5,15	32,0

Nos resultados da obra B (Tabela 13), o pilar PBFR1 e o bloco de fundação BFC3 (com valores próximos de porosidade) apresentaram carbonatações bem distintas (50,0mm e 15,07mm), entretanto no resultado de resistência superficial foram bem próximos. PBFR1 se encontra dentro do rio onde em tempos de cheias entra em contato contaminantes provindos dos esgotos sanitários degradando a superfície do concreto e ampliando a carbonatação.

Para os resultados obtidos da obra C (Tabela 13), os elementos BFC1 e BFC2 mesmo estando na mesma região da ponte, apresentaram valores diferentes de carbonatação (possivelmente devido a diferenças no adensamento do concreto nestas regiões), todavia os resultados bem próximos em relação a esclerometria e porosidade, demonstrando as propriedades mecânicas do concreto foram menos influenciadas. Similar ao verificado em BFR3 e BFR4, nos quais os valores de penetração da carbonatação foram bem distintos (2,46mm e 50mm), todavia a esclerometria teve resultados próximos (43,1MPa e 45,7MPa). De tal modo sendo, o elemento que apresentou maior índice de carbonatação foram os blocos de fundação, obtiveram também um valor mais alto de resistência superficial. Para outros elementos, constatou-se que já possuíam uma resistência mecânica maior, não apresentando carbonatação elevada, mesmo assim alterando o seu índice esclerométrico (ŠAVIJA, LUKOVIĆ, 2016; SZILÁGYI; BOROSNYÓI; ZSIGOVICS, 2011).

4.4 Composição química dos concretos

Os resultados da espectrometria de fluorescência de Raios-X, infravermelho (LECO) e a perda ao fogo em mufla a 1000°C estão expressos na

Tabela 14, juntamente aos mapeamentos químicos (Figura 38-40).

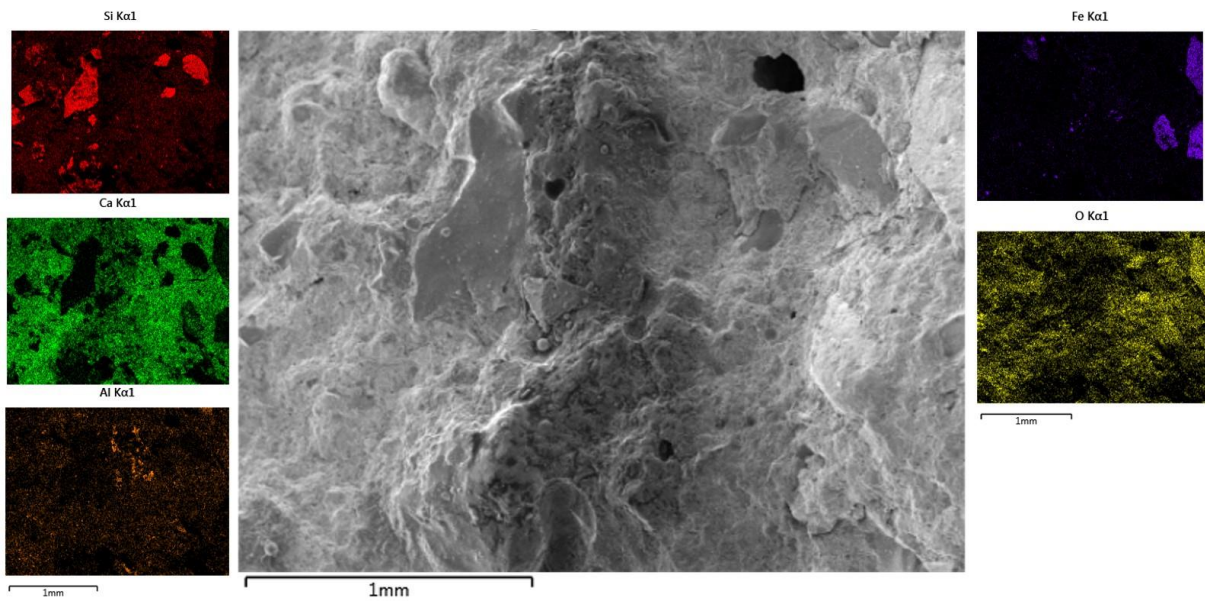


Figura 38- OAE-A: Pilar central – mapeamento químico – 50x.

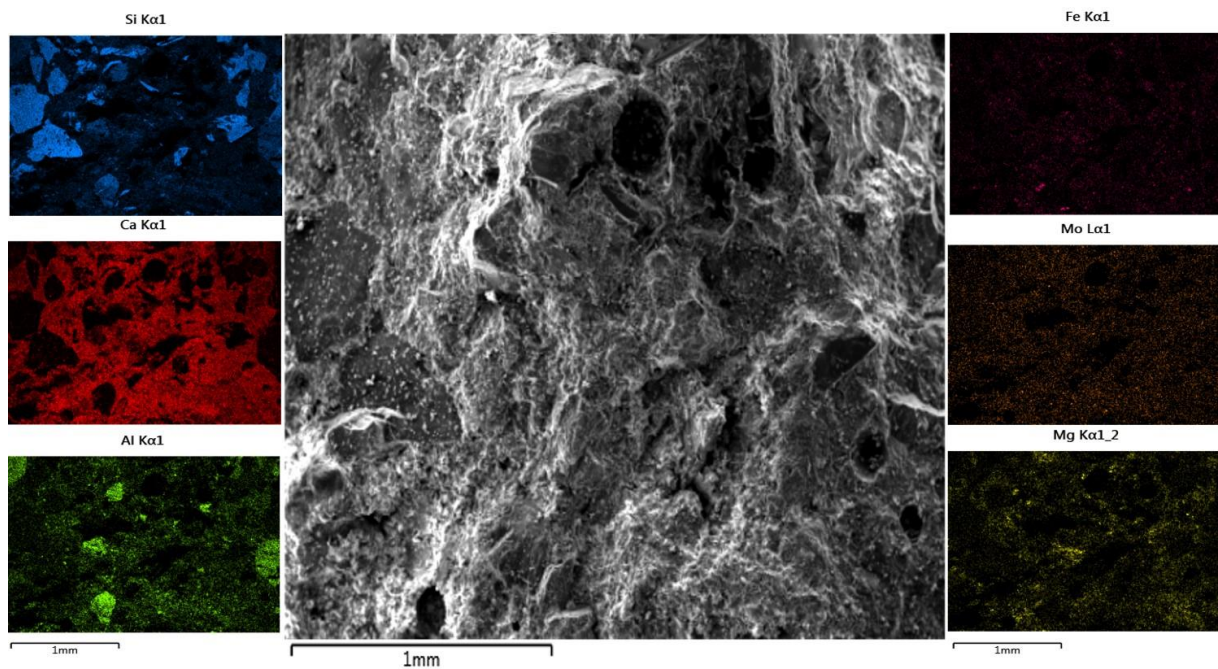


Figura 39 - OAE-B: Fundação viga geral – mapeamento químico – 50x.

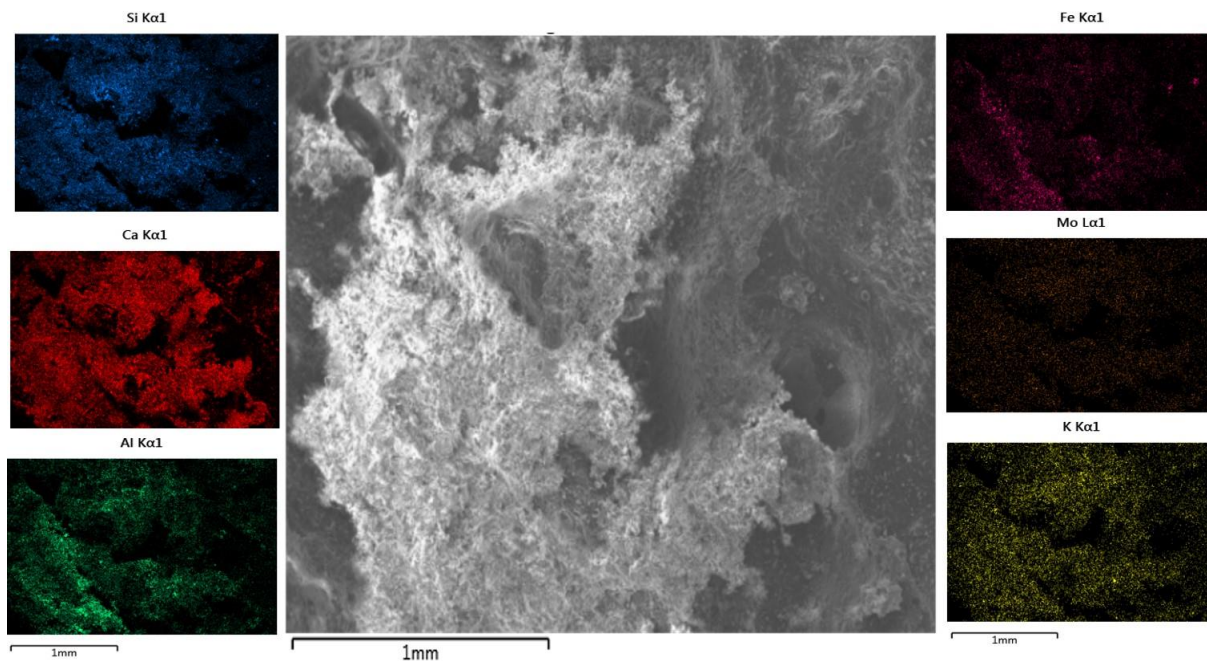


Figura 40 - OAE-C: Viga ligação – mapeamento químico – 50x.

Tabela 14 - Composição química % dos materiais coletados nas OEAs FRX/ Via úmida / infravermelho (LECO).

Obra/ Material	Gravimetria PPC1000°C	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	ZnO	Cl	C	S
A / P	16.29	8.09	17.66	0.09	7.88	0.83	1.21	0.11	0.91	0.09	45.99	0.38	0.01	0.02	0.01	4.36	0.15
A / A	7.73	11.74	9.59	0.08	5.62	0.92	4.24	0.34	3.06	0.05	56.02	0.39	0.01	0.01	<0.01	-	-
B / P	16.61	4.91	16.56	0.07	3.40	2.00	1.13	0.04	0.53	0.04	53.61	0.14	<0.01	<0.01	0.39	3.89	0.16
B / A	2.78	13.43	3.58	0.07	3.28	4.50	1.11	0.13	2.11	0.07	68.38	0.32	0.02	<0.01	0.05	-	-
C / P	14.43	5.82	18.19	0.07	4.44	0.81	0.88	0.26	0.40	0.04	53.90	0.30	<0.01	<0.01	0.04	3.35	0.11
C / A	0.65	14.72	3.98	0.09	2.68	1.94	0.84	0.21	4.28	0.02	70.30	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	-	-

Legenda: A/P, B/P e C/P – Obra A, B e C amostra da argamassa (cimento/areia); A/A, B/A e C/A - Obra A, B e C amostra do agregado graúdo.

Evidencia-se que a matriz, é rica nos elementos óxido de cálcio (CaO), silício (SiO₂) e alumínio (Al₂O₃). Portanto o silício se encontra no agregado miúdo em maior parte (MEV-Figura 38-40) e também na matriz, junto ao Cálcio tendo o carbono associado como calcita (CaCO₃) de acordo com resultados do FT-IR, devido ao efeito da carbonatação da matriz.

4.5 Fases minerais dos concretos

As verificações das microanálises (Figuras 38, 39 e 40) são confirmadas pelas identificações das fases minerais e das fases hidratadas presentes (Figura 41 e 42), conforme resultado da análise mineralógica semiquantitativa (Tabela 15). Correlacionando com a Tabela 14 e Figuras 38, 39 e 40, percebe-se ainda, que os compostos químicos de Si, O, Al e K, indicam que se trata do mineral microclina, um feldspato de origem gnáissica, estando em acordo com os demais ensaios DRX (A, B e C) e infravermelho. Destaca-se que ensaio DRX foi realização de

forma semiquantitativa, sendo apresentadas as estimativas de sua quantidade em: abundante; média e baixa proporção (Tabela 15).

Tabela 15 - Minerais (fases) presentes (% em massa) (Am19-2846) em proporção estimadas.

Amostra	Proporção dos elementos identificados		
	Abundante	Média	Baixa
A / P	Quartzo	Calcita, amorfo,	Albita, Caulinita, Hematita, Portlandita
A / A	Quartzo, Albita	Calcita, amorfo, Caulinita	Moscovita, Hematita, Portlandita
B / P	Quartzo	Calcita, amorfo, Microclima	Albita, Portlandita
B / A	Quartzo	Microclima, Albita, amorfo,	Moscovita, Calcita, Portlandita, Caulinita
C / P	Quartzo	Calcita, amorfo,	Portlandita, Albita, Microclima, Hematita
C / A	Quartzo	Albita, amorfo	Moscovita, Calcita, Portlandita

Legenda: A/P, B/P e C/P – Obra A, B e C amostra da argamassa (P) (cimento/areia); A/A, B/A e C/A - Obra A, B e C amostra do agregado (A).

Constata-se na DRX (Tabela 15 e Figura 41 e 42) que o principal mineral é a sílica (SiO_2), apresentando pouca variação nas três OEAs. Este resultado também foi encontrado no FI-TR (Figura 43 e Tabela 16), onde os picos na vizinhança de 875 podem ser atribuídos ao modo de vibração de alongamento do dióxido de silício (Si-O) no cimento hidratado (KUMERDARS-HAN *et al.*, 1990; SUGAMA, KUKACHA, 1982; HERJNDEZ *et al.*, 1996, REIG *et al.*, 2002), que são caracterizadas como o estiramento antissimétrico e a deformação angular C-O da calcita, respectivamente (BESSLER, RODRIGUES 2008; RODRIGUES, 2013). A presença de silicatos, feldspato, microclima colabora a presença geológica de região, tendo o gnaiss como rocha predominante da porção plutônica do magmatismo que deu origem ao Grupo Nova Lima.

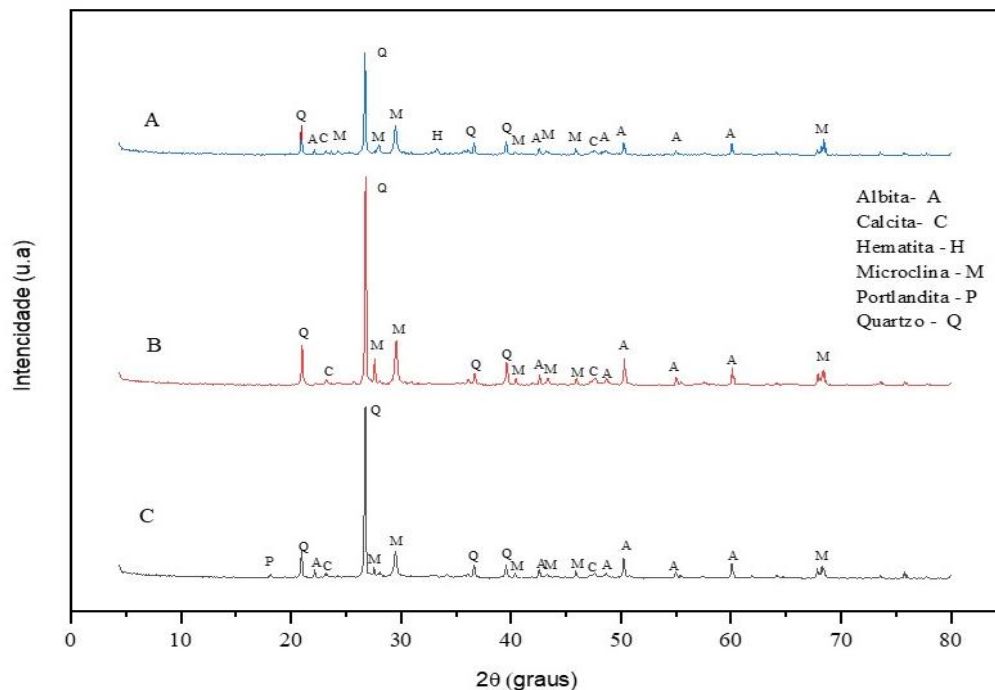


Figura 41 - Difração de Raios-X da argamassa (areia e cimento) das vigas.

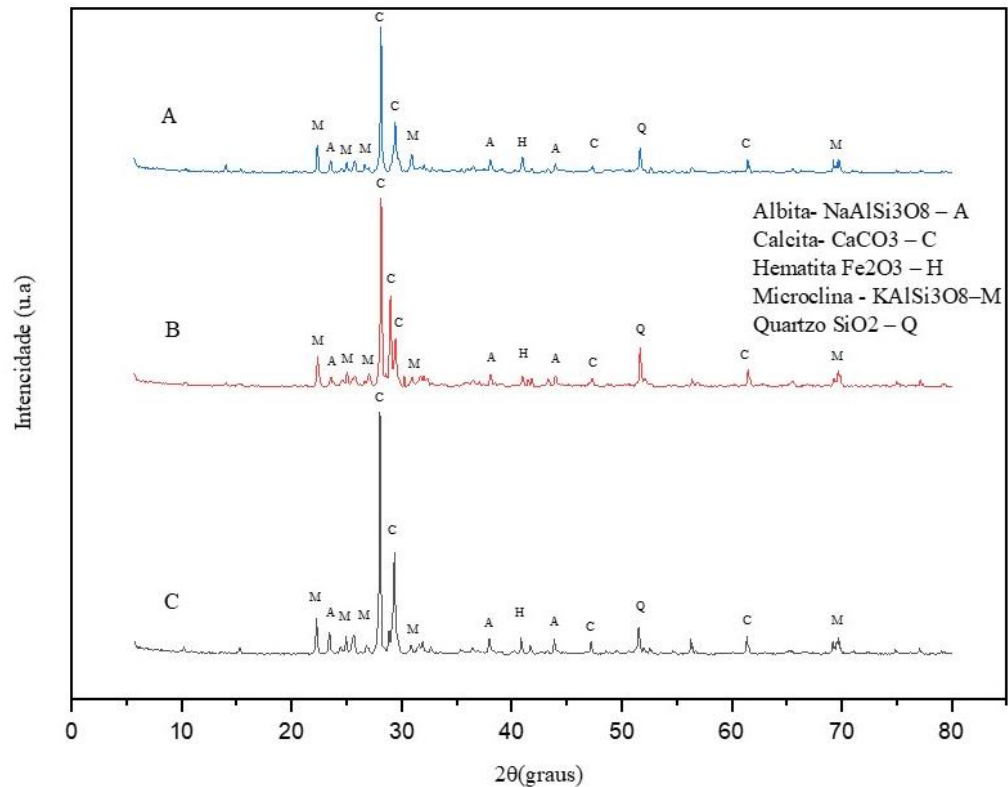


Figura 42- Difração de Raio-X do agregado graúdo das vigas.

A areia proveniente de leito de rio (comumente usadas nestes concretos) tende a ser quartzosa conforme resultados de FT-IR (Tabela 16 e Figura 43), que apresentam picos na banda 779 que está principalmente relacionado ao quartzo (REIG, *et al.*, 2002; FRIOLO, 2003). Estes elementos também são identificados, na banda 1446 quartzo (SiO₂), dolomita (CaMg (CO₃)₂ (carbonato de cálcio duplo e magnésio) (REIG *et al.*, 2002). Tem ainda, uma contribuição de partículas de origem gnáissica que é comprovada pela presença de microclina (Feldspato - K(AlSi₃O₈)), presentes nas três obras.

O segundo mais presente na pasta de cimento é o CaO que consiste na amostra da Calcita (CaCO₃) encontradas na DRX (Tabela 15, Figura 41), e de acordo com ensaio de FT-IR (Tabela 16, Figura 43), são atribuídas a fase de 713 (ANDERSEN, 1991; REIG, 2002) concernente à deformação angular fora do plano ν_4 (HUGHES *et al.*, 1995; JANOTKA *et al.*, 1996) estando presente nas três OEAs.

Encontrou-se na DRX (Tabela 15, Figura 41) os óxidos de ferro que se associam aos minerais de ferro, presentes na areia, assim como outros elementos minoritários e baixos, como MnO, TiO₂ (CARP *et al.*, 2004), que podem ser provenientes ainda das águas dos rios que cruzam as pontes, já que a região está inserida no quadrilátero ferrífero brasileiro. Esta presença é corroborada pelas vibrações 796 FT-IR (Tabela 16, Figura 43) que consistem Ti-O do

Anastásio e de 1084 (Si–O) da hematita carregada com oxalato (KHORSHIDI e AZADMEHR, 2016). Também se observaram partículas de minerais de ferro, com presença de hematita presentes nas obras A e C, impurezas comumente associadas a estes minerais como compostos de manganês e titânio. Os outros elementos, Al_2O_3 , K_2O , e Na_2O , além de parte da sílica, compõem o feldspato microclima estando de acordo DRX (Tabela 15, Figura 41).

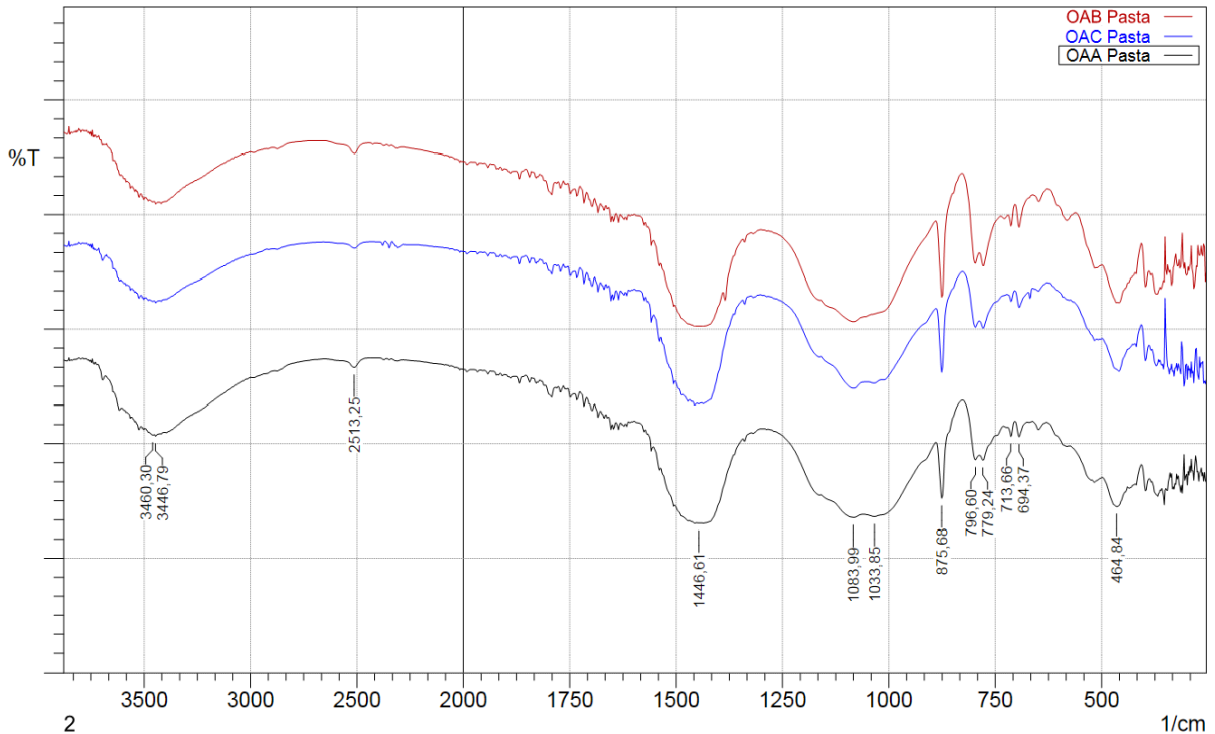


Figura 43 - Resultado de FI-TR da argamassa.

Segundo Metha e Monteiro (2008) a Portlandita (CH) encontra-se numa constituição de 20 a 25% do volume de sólidos na pasta de cimento hidratada que estão presentes nas três obras, o que foi corroborado pelo ensaio de FI-TR (Tabelas 14, 15 e 16 e Figura 43). Constatou-se que com o passar dos anos, nas regiões analisadas, o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) transformou-se totalmente em calcita ($CaCO_3$) nas três obras devido ao fenômeno da carbonatação (reação com o CO_2 atmosférico) (PAPADAKIS *et al.*, 1991; THIERY *et al.*, 2007; PETER *et al.*, 2008). As reações de carbonatação não só são proeminentes ao $Ca(OH)_2$, que ocorre entre CO_2 e o Portlandita ($Ca(OH)_2$), mais em todos os demais elementos hidratados do cimento, C-S-H (silicato de cálcio hidratado), sulfato trihidratado (etringita), monossulfato hidratado, C_3S (silicato tricálcico) e C_2S (silicato dicálcico) (PAPADAKIS *et al.*, 1991; PETER *et al.*, 2008; WANG; LEE, 2009). Tem-se que os álcalis presentes na pasta de cimento, em pequenas quantidades, como KOH (hidróxido de potássio), NaOH (hidróxido de sódio) e $Mg(OH)_2$ (hidróxido de magnésio), além das fases dos aluminatos, também estão suscetíveis à carbonatação Peter *et al.*

(2008). De acordo com Panzera (2010), os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e hidróxido de cálcio ou Portlandita (CH) fazem parte de hidratação do cimento Portland e estão presentes nas bandas 3460 (Figura 43 e Tabela 16) que são alusivas à água constituinte e absorvida pelos silicatos e sulfoaluminatos de cálcio.

Tabela 16 - Identificação de espectros de FT-IR (cm-1)

Bandas	Grupo	Possíveis componentes presentes	Bibliografia
3460	OH ⁻	Compostos hidratados	(PANZERA,2010)
3446	K OH	Kapardika Bhasmas etringita	(DHAMAL <i>et al.</i> , 2013), MEENA DEVI <i>et al.</i> , 2010) e (TAYLOR, 1990).
2513	C-H	hidroxila	(WU, 2012)
1446	(SiO ₂), (CaMg (CO ₃) ₂)	Quartzo e Dolomita	(REIG, et al, 2002)
1084	(Si-O)	Hematita	(KHORSHIDI e AZADMEHR, 2016).
1033	Si-O-Si	Caulinita	(CHENG <i>et al.</i> , 2010); (KUTLÁKOVÁ <i>et al.</i> , 2011) e (MANOHARAN <i>et al.</i> , 2012)
875	C-O	Calcita	(BESSLER & RODRIGUES, 2008) e (RODRIGUES, 2013)
796	Ti-O	Anastásio	(CARMONA <i>et al.</i> , 2015)
779	(SiO ₂)	Quartzo	(REIG, <i>et al.</i> , 2002) e (FRIOLO, 2003)
713	CaCO ₃	Calcita	(ANDERSEN, 1991), (REIG, 2002) (HUGHES <i>et al.</i> , 1995) e (JANOTKA <i>et al.</i> , 1996)
694	Estreitamento Si-O quartzo	Quartzo	(REIG <i>et al.</i> , 2002), (BISCONTIN, 2002)
	Estreitamento Si - O caulinita	Caulinita	(FRIOLO, 2003), (SAIKIA, 2003) e (BOUGEARD, 2000).
460	Si-O	Silicatos	(FERRARESI, 2012).
	Al-O	C ₃ S e C ₂ S C ₃ A	(MOLLAH <i>et al.</i> 1998) (THAYLOR,1990)

A caulinita depois de sofrer transformações térmicas, forma a metacaulinita, um aluminossilicato de estrutura desordenada apesar de não possuir propriedades aglomerantes, reage quimicamente com CH, dando origem a compostos hidratados com propriedades cimentícias e insolúveis em água (MOTHÉ, 2004). A Caulinita, apresenta a banda 1033 (FT-IR, Tabela 16 e Figura 43) estando relacionada às vibrações de estiramento Si-O-Si do plano interno da folha tetraedral (CHENG *et al.*, 2010a; KUTLÁKOVÁ *et al.*, 2011; MANOHARAN *et al.*, 2012). Isto é corroborado pela análise de absorção no máximo medido 694, correspondente ao estreitamento Si-O de quartzo (REIG *et al.*, 2002; BISCONTIN, 2002), da caulinita (FRIOLO, 2003; SAIKIA, 2013; BOUGEARD, 2000) e de silicatos (FERRARESI, 2012).

Na análise dos agregados presentes nas OAEs, correlacionou-se os valores encontrados de DRX (Tabela 15) com estudos realizados Hentz (1970), Magalhaes, (2007) e Fonseca (2013), permitindo definir que os agregados presentes nas três obras são de gnaisses. Constatou-se ainda que nas bandas C-H hibridizadas e os picos em torno de 2509-2513 cm⁻¹ da FT-IR

(Figura 43 e Tabela 16) são atribuídos a matérias orgânicas que continham hidroxila (Wu, 2012). De acordo com Metha e Monteiro (2008) e Ferraresi (2012), as proporções mais encontradas nos cimentos Portland não hidratado são: $C_3S=45-60\%$; $C_2S=15-30\%$; $C_3A=6-12\%$; $C_4AF=6-8$, que foram identificadas junto a banda de 460 FT-IR (Tabela 16 e Figura 43). Destaca-se que estas fases não foram identificadas nos ensaios DRX (Tabela 15). Possivelmente estejam embutidas no material amorfo encontrado nas três pontes, relatando a existência de cimento anidro nas pontes. Isto pode ser em função de não hidratação do cimento em função da idade (obra mais nova) ou do tamanho das partículas, no caso dos cimentos antigos.

4.6 Análise termogravimétrica dos concretos

A análise termogravimétrica (TG/DTG) apresentada na Figura 44 para OAE A, demonstra reações referentes à desidratação do C-S-H, visualizadas entre 150°C e 300°C no pico exotérmico (NOBRE,2016), com perda de massa total da amostra de 0.457 mg e massa residual de 85.30%. Já nas OEAs B e C (Figura 45 e 46), pode-se destacar os picos exotérmicos entre 60°C e 100°C devido a decomposição da etringita (NOBRE, 2016), da água adsorvida pelos compostos hidratados e da água livre nos poros, gerando uma perda de massa e massa residual na obra B de 0.637 mg e 84.20 % e na obra C de 0.445 mg e 88.71 %, respectivamente.

No segundo pico endotérmico da OAE A ocorreu entre o intervalo de temperatura 600°C e 850°C (BORGES, 2002), correspondente à descarbonatação da calcita ($CaCO_3$) com uma perda de massa 0.004 mg e massa residual de 83.31 %. Similar a Obra C com uma perda de massa 0.011 mg e massa residual o valor de 86.56 %. Já na Obra B, identificou-se um pico endotérmico na temperatura 866°C atribuído à cristalização dos metassilicatos (TRN'K *et al*, 2015), gerando uma perda de massa 0.051 mg e com massa residual o valor de 81,16 %.

De acordo com a curva da DTA (Figura 44-46), verifica-se uma mudança de fase uma endotérmica em torno de 700°C indicando a descarbonação do carbonato de cálcio que contribui à decomposição da calcita ($CaCO_3$) com a emissão de CO_2 (pirólise). Em compostos cimentícios hidratados a medida da área desse pico fornece a quantidade de energia liberada nessa reação que é recorrente nas obras A, B e C (VEDALAKSHMI *et al.*,2003). Portanto a perda de massa da calcita natural se dá na temperatura superior, isto realça que a calcita presente nas amostras não é natural, é susceptível da carbonatação sendo maior na obra B, predispondo a maior queda em seu pH em relação aos concretos mais antigos (BRANDÃO, 2010).

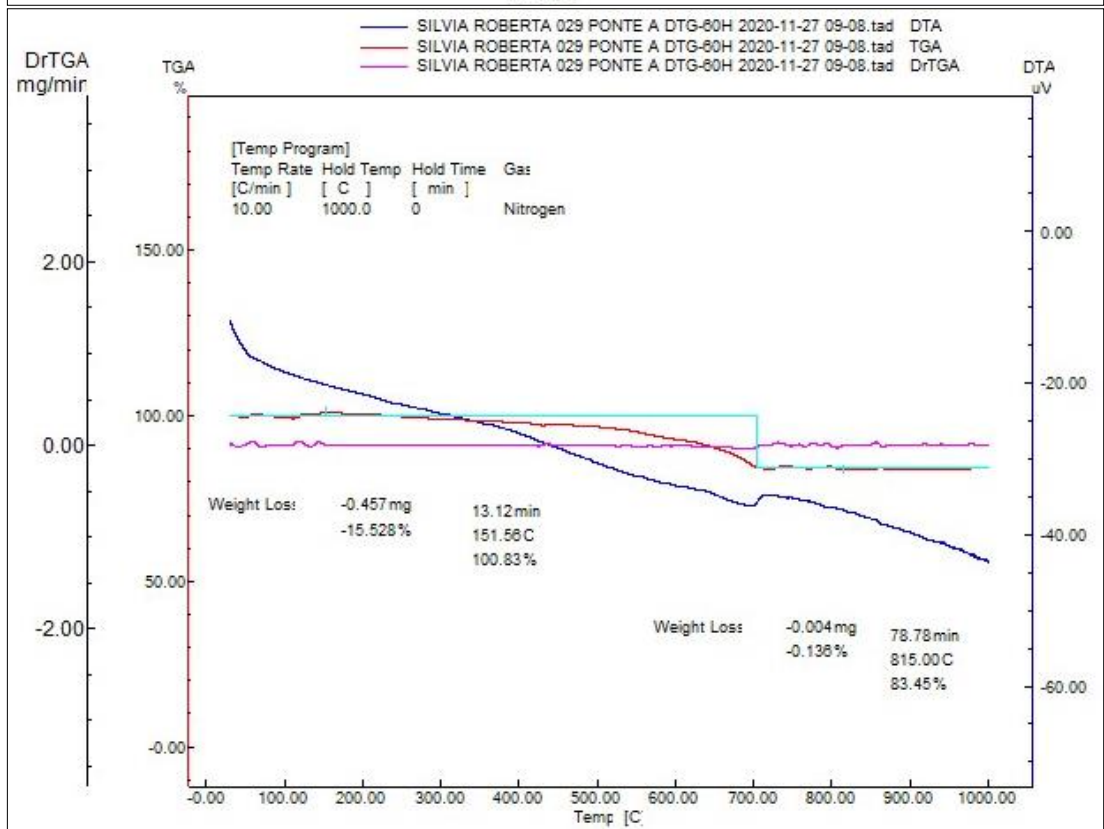
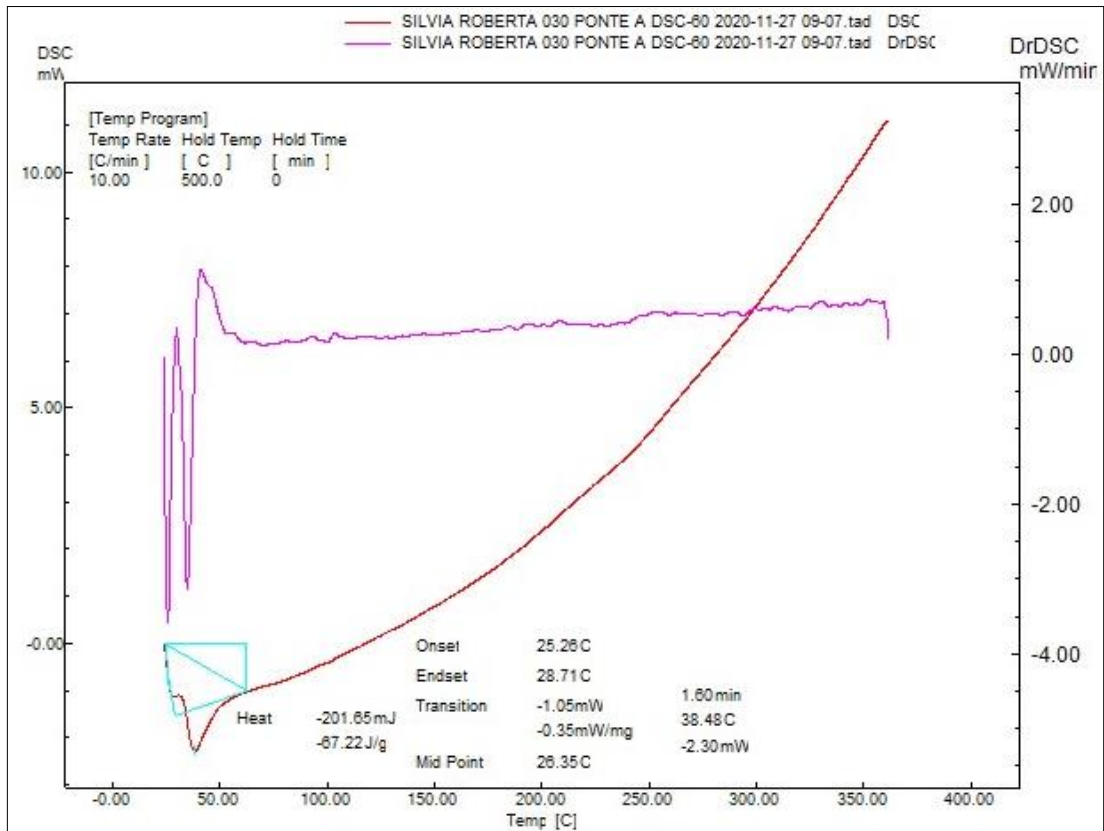


Figura 44 – Apresentação de uma curva de DrTGA/ TGA/ DTA e DSC obra A.

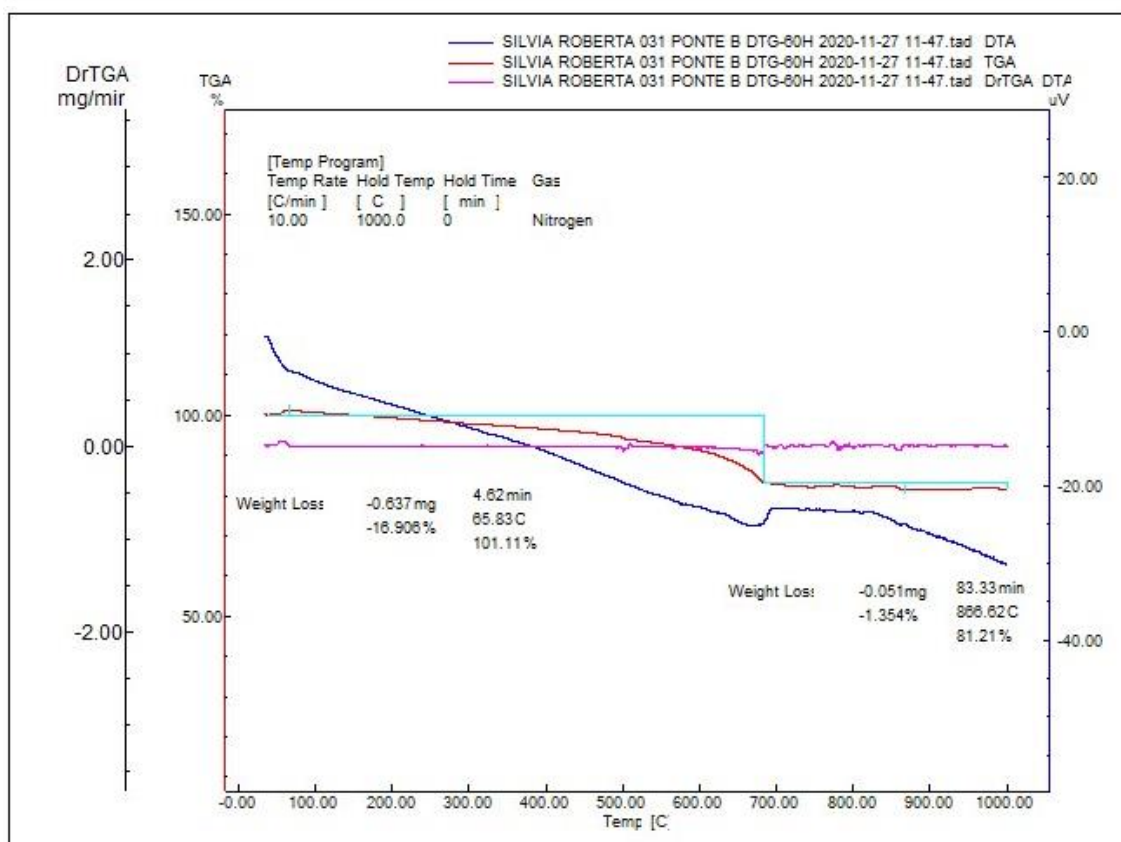
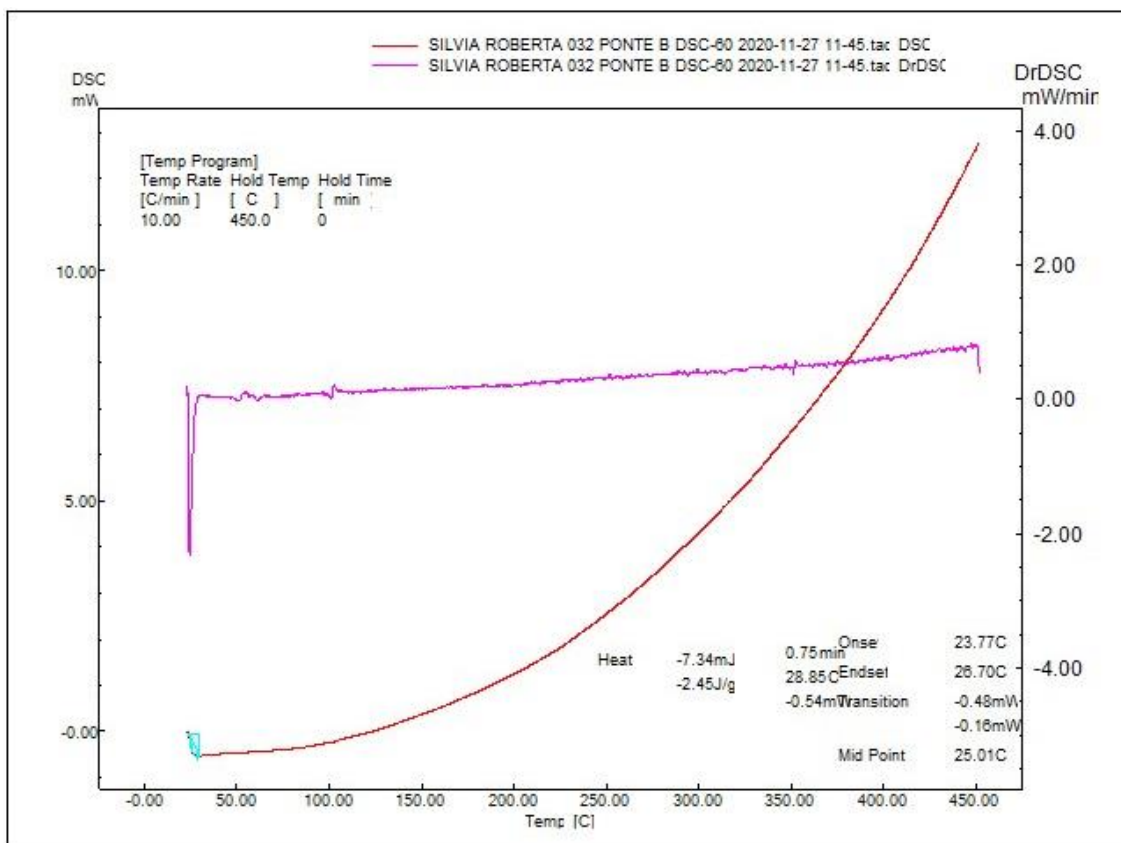


Figura 45– Apresentação de uma curva de DrTGA/ TGA/ DTA e DSC obra B

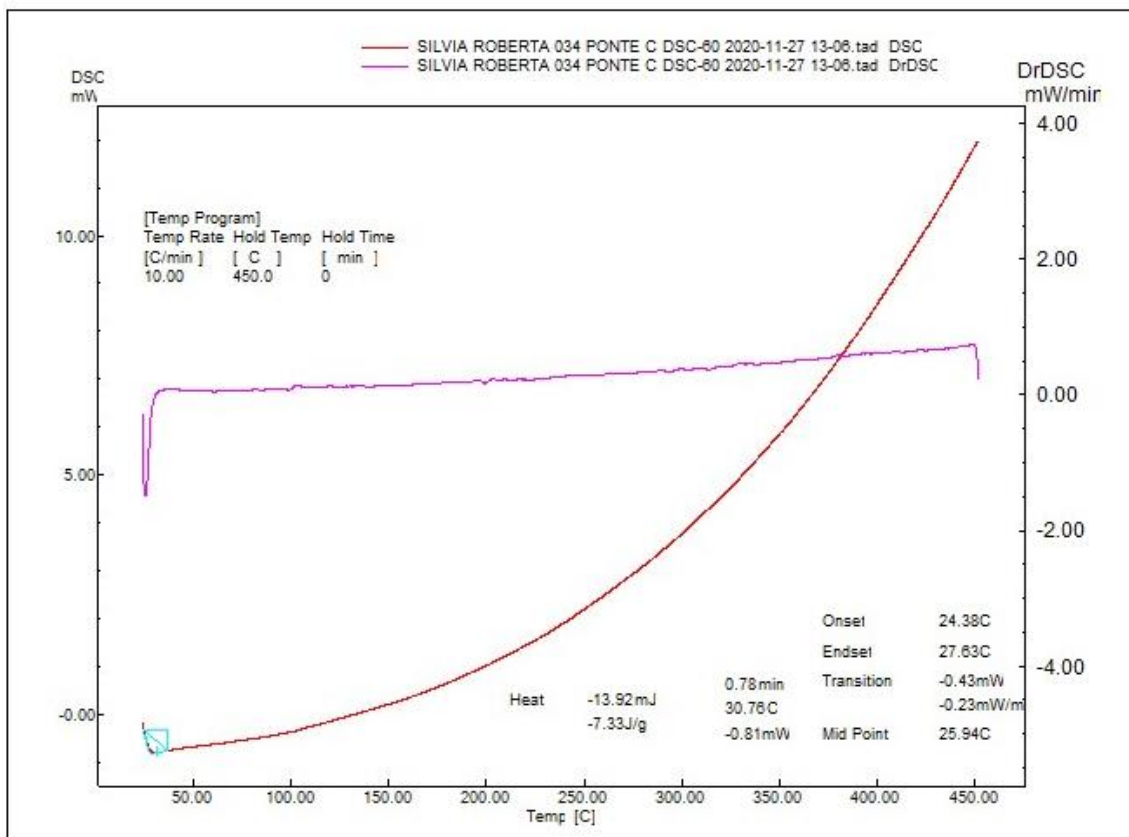
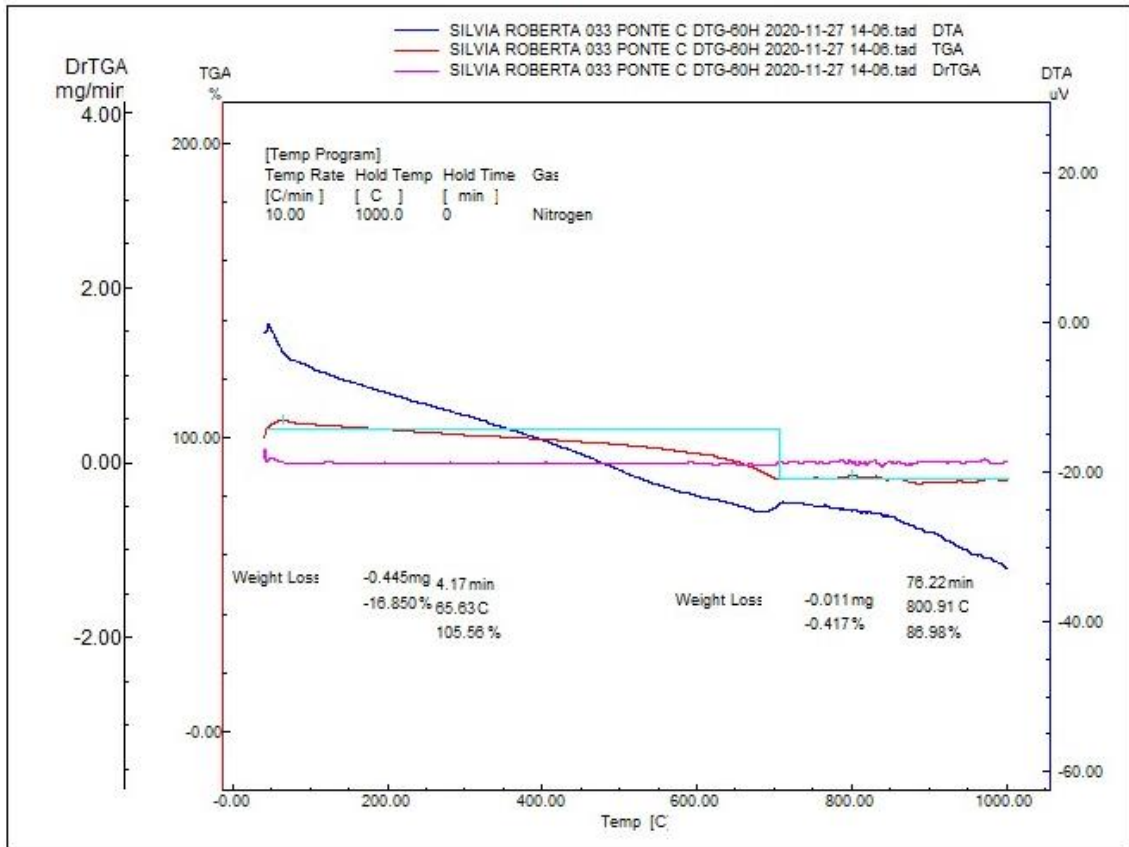


Figura 46– Apresentação de uma curva de DrTGA/ TGA/ DTA e DSC obra C.

Com o aumento dos teores de C_3S (sendo que em países desenvolvidos as alterações nas composições químicas se deram a partir da década de 1930 e no Brasil somente na década de 1960) se gera resistências maiores nas primeiras idades. Associado a isto, o uso de cimento com maior módulo finura do cimento, formando C-S-H, tem-se o aumento na liberação de calor no concreto. Quando o concreto resfria rapidamente, pode gerar fissurar devido a retração por secagem. Neste contexto, destaca-se uma maior descarbonatação da calcita ($CaCO_3$) na obra B, tendo em vista que foi construída na década de 1960, nos quais as composições do cimento já contavam com um acréscimo C_3S ocasionando uma maior carbonatação do concreto. Na obra A, a carbonatação se deu em menor valor, pois na época o cimento não possuía adições de escoria de alto-forno, sendo eminentes menores os índices de carbonatação. Na obra C, observa-se índices próximos da obra A, porém se trata de uma obra mais recente (de 3 anos), corroborando com os resultados de DRX, FT-IR.

Na análise de DSC ocorreu um único evento registrado nas temperaturas 25-123,3°C (*onset* e *endset*) em virtude da desidratação da água dos poros (ALMEIDA e SICHIRI, 2006; UGI-ONI e GODINHO, 2017). A temperatura média e a perda de massa em cada ponte foram, respectivamente: obra A, de 26,35 °C e 67.22 J/g; obra B de 25,35 °C e 2,4 J/g e obra C, 25,94 e 7.33 J/g. Corroborando com o ensaio de termogravimetria (Figura 44-46) e perda ao fogo (Tabela 14), no qual as perdas de massa no final, na obra A foram de 16,55 % devido a água adsorvida pelos compostos hidratados e da água livre nos poros dos compostos C-S-H, calcita ($CaCO_3$), na obra B correspondeu a 18,79 % devido a decomposição da etringita e metassilicatos, na obra C foi de 13,02 % em função da decomposição da etringita e descarbonatação da calcita.

4.7 Análise microestrutural dos concretos

Nas imagens de MEV, pode-se visualizar a matriz cimentícia a algumas partículas de agregados provenientes do concreto das três OAEs. Pela Figura 47 tem-se uma amostra de pilar da obra A, nos quais se visualiza várias partículas provenientes da areia quartzosa, comprovado pelas análises de EDS (Figura 38), e alguns poros presentes na matriz do concreto. Constatou-se em toda a amostra da Obra A, a presença de C-S-H (Figura 48) visualizado como aglomerados de partículas, pequenos grãos equiaxiais formando flocos. Esta morfologia predominante é caracterizada como a do tipo III (LEA, 1970; JAWED *et al*, 1983).

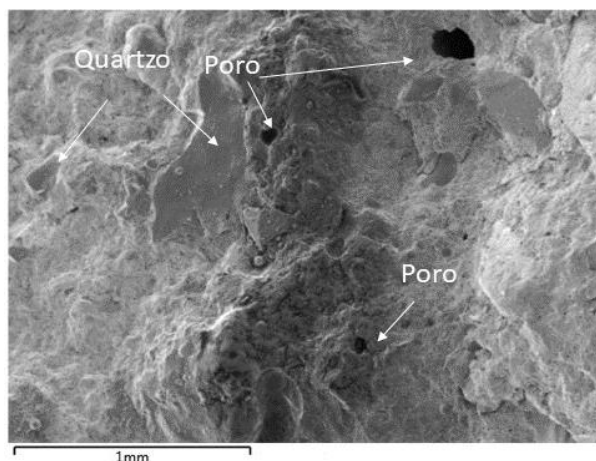


Figura 47– Obra A pilar central mapa 50x

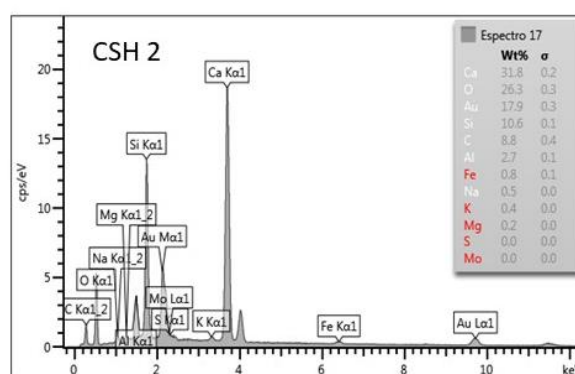
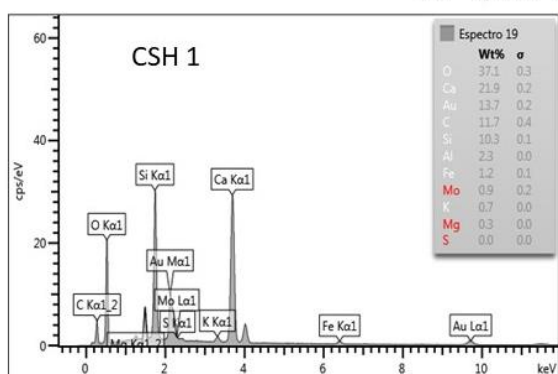
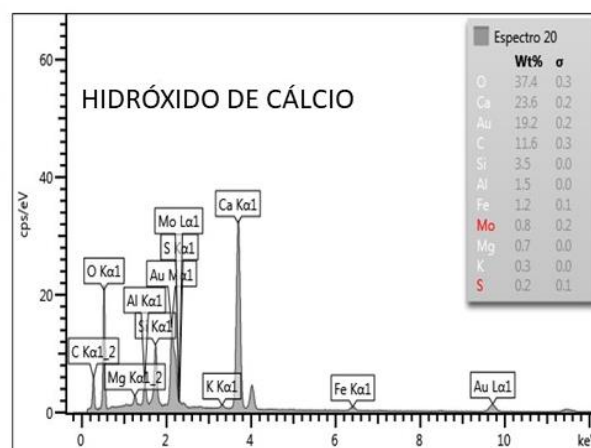
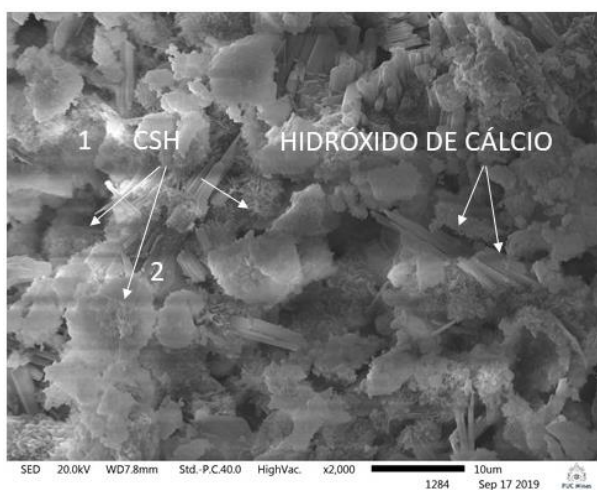


Figura 48–Na obra A, Argamassa 2000 x.

Detectou-se também cristais de hidróxido de cálcio, Portlandita (CH), que é outros compostos não hidratados C_3S e C_2S . O CH corresponde à reserva alcalina que garante a passividade da armadura contida na matriz de cimento (Figura 48 e 49). É caracterizada por placas hexagonais finas e alongadas (NEVILLE, 2008), muitas vezes com apenas algumas dezenas de microns de largura (HARUTYNYAN *et al.*, 2003), e bordas claramente definidas, normalmente organizadas em grandes aglomerados em torno do agregado (DIAMOND, 2004) (Figura 48 e

49). Comportamento similar foi percebido na obra B (Figura 50) onde também se identificou a presença de CSH aderido ao agregado.

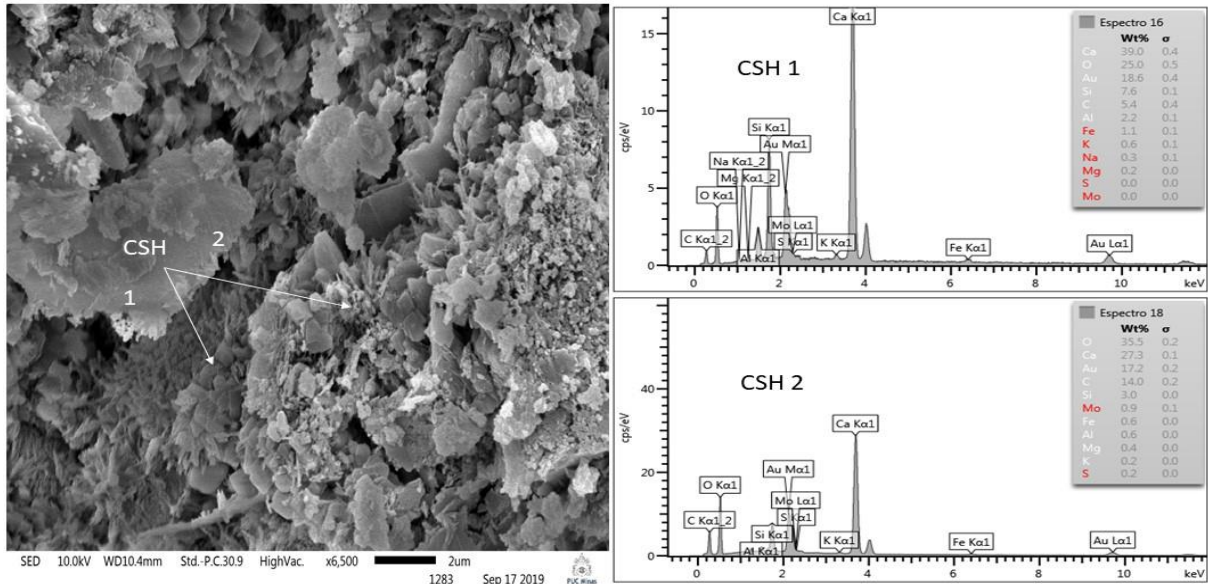


Figura 49 - Na obra A, Hidróxido de Cálcio e argamassa 6500 x - EDS CSH.

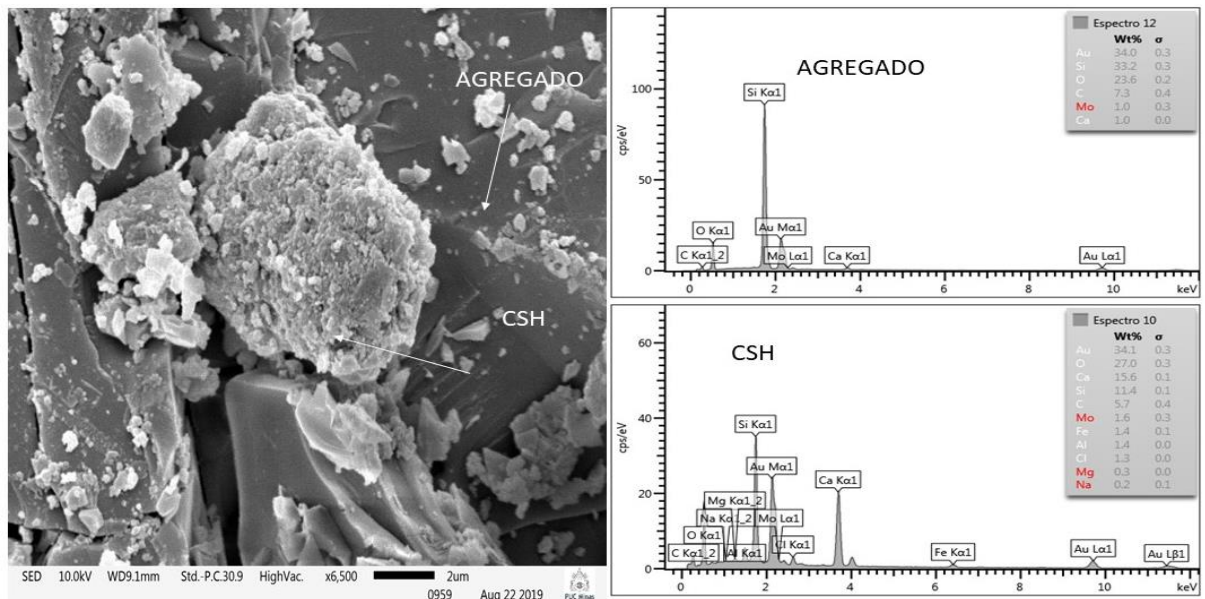


Figura 50 - Na obra B, Pilar Argamassa 6500 x - EDS CSH, EDS Agregado.

Na obra C (Figura 51), constatou-se uma estrutura formada por produtos hidratados arredondados, em forma de flocos, cuja microanálise indicou alguns serem silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) (LEA, 1970; JAWED *et al*, 1983) e outros etringita instável que está se transformando em monossulfato (MS) (FERRÃO e PAULON, 2016). Na análise de FT-IR (Tabela 16 e Figura 43) pico 3446 é atribuído à água da rede e matéria orgânicas associadas

(MEENA *et al*, 2010) e a banda em 3440-3446 que pode representar ao estiramento OH, presente nas fases de C-S-H, monossulfoaluminato e/ou etringita (TAYLOR, 1990). Ou seja, é comum, durante o processo de hidratação do cimento, em obras novas encontrar tal situação.

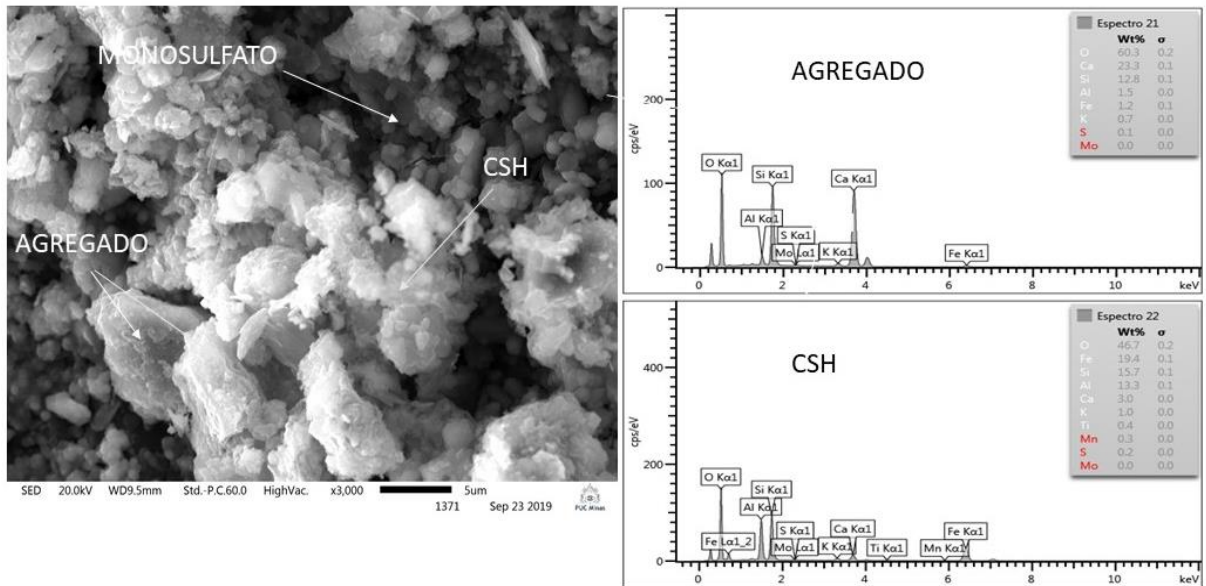


Figura 51- Na obra C, Viga 3000 x - EDS Quartzo - EDS CSH.

Em outra micrografia da obra C (Figura 52 e 53), encontrou-se um grão de cimento anidro, juntamente com uma fase de C-S-H presente na maior parte da amostra (ampliação de 3000 vezes). Na ampliação de 5.500 (Figura 53), identifica-se a formação do C-S-H sobre o agregado que está presente na amostra.

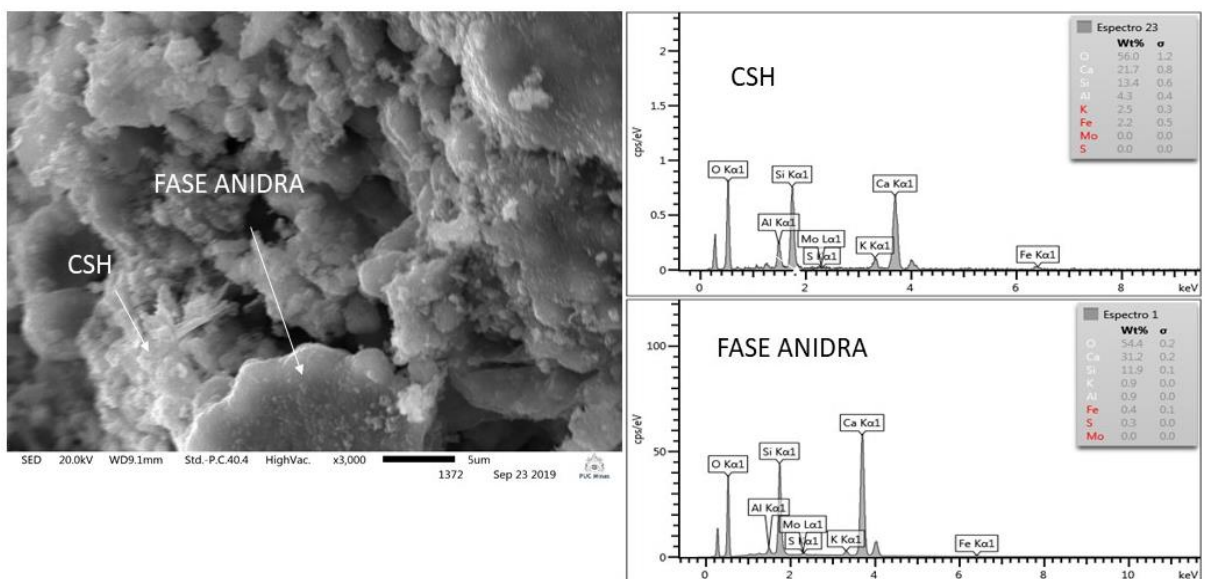


Figura 52 - Na obra C, Viga 3000 x - EDS CSH, Fase Anidra.

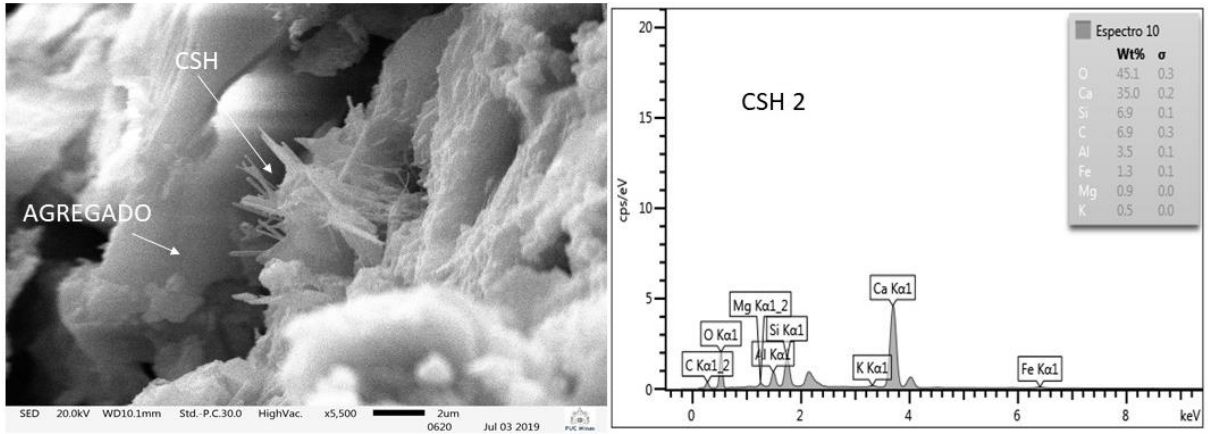


Figura 53 - Na obra C, Bloco de fundação agregados 5500 x - EDS CSH

5 CONCLUSÃO

Através dos resultados pode-se delinear conclusões relativa as três OAEs em suas respectivas idades e os seus materiais utilizados. Pode-se concluir que:

- a porosidade e absorção por imersão demonstraram que a idade da OAE influencia, sobretudo nas mais antigas que usavam maiores teores de água (devido aos parâmetros normativos e de produção), além de estarem a mais tempo sob ação das intempéries. Isto é corroborado pelos resultados das vigas e lajes que foram classificadas intermediárias, enquanto os blocos de fundação (nas três obras) foram deficientes.
- a carbonatação dos elementos estruturais expostos ao rio foi maior em relação as vigas e pilares fora do rio. Isto ocorreu devido o contato direto com agentes agressivos (devido a contaminação das águas dos rios), pelos efeitos de variação de umidade (gerando dilatação e contração higroscópica) e do fluxo de água (causando escarificação e remoção da matriz).
- a resistência superficial foi mais elevada nos elementos estruturais que apresentam maior índice de carbonatação, devido ao aumento da dureza superficial. Contudo, condições de exposição aos agentes agressivos do rio e variação de umidade também foram fundamentais. Sendo que a umidade tendeu a aumentar devido ao efeito benéfico da cura submersa, enquanto os agentes agressivos geraram deterioração por causa da presença de matéria orgânica nas águas.
- os elementos químicos, fases minerais e amorfas convencionais foram encontrados, com destaque para a calcita (CaCO_3) proveniente da carbonatação dos compostos hidratados do cimento. Os agregados miúdos (areia quartzosa) e grãos (gnaisse) estavam presentes nas três OAEs. Pode-se concluir que as adições minerais no cimento geram menor formação de Portlandita (menor alcalidade) e o aumento da finura dos cimentos maximizou o calor de hidratação. Esta tentem aumentar a resistência inicial (acelerando os processos de produção), mas podem causar ampliar a incidência de retração aumentando, por conseguinte, a frente de carbonatação. Assim em obras atuais é primordial o controle de produção com resfriamento do concreto e cura adequada. Somente nestas condições se conseguirá edificações duráveis.
- na microscopia, vários tipos de silicatos de cálcio hidratado C-S-H, com várias morfologias e composições, nos quais a de tipo III (grãos equiaxiais formando flocos) foi a mais dominante nas três obras. Detectou-se também cristais de hidróxido de cálcio, Portlandita (CH) nas obras A, B e C. Na obra C, observou ainda a presença de etringita instável se transformando em monossulfato (MS) e uma fase anidra do cimento, demonstrando que o processo de hidratação ainda está vigente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. **NB1- 1940**: Cálculo e execução de concreto armado. Rio de Janeiro, 1940.

_____. **NB1 1960**: Cálculo e execução de obras de concreto armado, Cargas móveis em pontes rodoviárias, Barras de aço torcidas a frio para concreto armado. Rio de Janeiro, 1960.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland de alta resistência, 2018.

_____. **NBR 5753**: Cimento Portland - Ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico 2016.

_____. **NBR 7188**: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7584**: Concreto endurecido — Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9452**: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASTM C 109-92 - ASTM C-1. - Standard Specification for Portland Cement – ASTM 1993.

ASTM E 928-03. Standard Test Method for Purity by Differential Scanning Calorimetry”, West Conshohocken, USA, 2003.

ALEXANDER, M.; BENTUR, A.; MINDESS, S. **Durability of Concrete: Design and Construction**. 1 ed. New York, 2017. 345p.

ALEX, P./Semcom. Disponível em <<https://d24am.com/amazonas/ponte-no-bairro-nova-esperanca-esta-liberada-para-o-trafego/>> acesso em: 01/12/2019.

ANDERSEN, F.; BRECEVIC, L. Infrared spectra of amorphous and crystalline calcium carbonate. **Acta Chemical Scandinavica**. v. 45, pag 1018-1024, 1991.

ANN, K.Y.; PACK, S.-W.; HWANG, J-P. *et al.* Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 24, n. 8, p. 1494-1501, ago. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.023>.

ALMEIDA, A. E. F. S.; SICHIRI, E. P. Thermogravimetric Analyses and Mineralogical Study of Polymer Modified Mortar with Silica Fume. **Materials Research**. V. 9, No. 3, p.321-326, 2006.

AMERICAM SOCIETY OF ENGINEERS - ASCE- Report Card for America's Infrastructure. Washington, D.C, 2009. 168 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - **ACI 228.2R**, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structure, 1998.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - **ACI 228 - 1R**, In place methods for determination of strength of concrete, Detroit, p. 26, 1989.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - **ACI 228.2R**. Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills, U.S.A., 2018.p.86.

ARANDIGOYEN, M.; BICER-SIMSIR, B.; ALVAREZ J.I.; LANGE, D.A. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. **Applied Surface Science**. v.252, p. 7562–7571, 2006.

BISCONTIN, G.; BIRELLI, M. P.; ZENDRI, E. Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars. **Journal of Cultural Heritage**.v.3, p. 31-37, 2002.

BLACK, L.; BREEN,C; YARWOOD, J; *et al.* **Structural features of C-S-H (I) and its carbonation in air—a Raman spectroscopic study**. Part II: Carbonated phases, J. Am. Ceram. Soc. 90 (3) 908–917. 2007.

BLACK, L.; GARBEV, K.; GEE, I. Surface carbonation of synthetic CSH samples: a comparison between fresh and aged CSH using X-ray photoelectron spectroscopy. **Cement and Concrete Research**. v. 38, p. 745–750, 2008.

BRANDÃO, P. R. G. **Apontamentos das aulas da Disciplina: Métodos de Instrumentação e Análise**. Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Mina do 129 Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

BROOMFIELD, J. P. **Corrosion of Steel in Concrete. Understanding, Investigation and Repair**. Second ed. New York, USA. 2007, p. 294.

BUNGEY, J.; MILLARD, S.; GRANTHAM, M. G. **Grantham Testing of Concrete in Structures**. 4 ed. New York, USA: Champan e hall, 2006. 310p.

AGRAWAL, A. K. **Bridge vehicle impact assessment. University Transportation Research Center**. Department of Transportation. New York State, 2011.

AZENHA, M.; GABRIJEL, I.; SCHLICKE, D.; *et. al.* Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Service Life of Cement-Based Materials and Structures. **International Rilem Conference on Materials. Technical University of Denmark**, Lyngby, Denmark. v. 1, p. 22-24, August 2016.

AZEVEDO, M. T. **Patologia das Estruturas de Concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto—Ciência e Tecnologia**. v.2; São Paulo, 2011.

BARBOSA, M. T. ; POLISSENI, A. E.; HIPPERT, M.; SANTOS, W. J. S. Patologias de Edifícios Históricos Tombados Estudo de Caso – Cine Teatro Central. **Vitruvius**, janeiro 2011.

BASHEER, L., KROPP, J; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. **Construction and Building Materials**. v.15, p. 93– 103 2001.

BESSLER, K E.; RODRIGUES, L. C. Os polimorfos de carbonato de cálcio – uma síntese fácil de aragonita. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 31, n 1, p. 178-180, 2008.

BAZANT, Z. P., Yu, Q., & Li, G.-H. Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. I: Record-Span Bridge in Palau and Other Paradigms. **Journal of Structural Engineering**. v 138, p. 676–686, 2012 a.

BAZANT, Z. k P.; Yu, Q.; Li, G.H. Excessive Long-Time Deflections of Prestressed Box Girders. II: Numerical Analysis and Lessons Learned. **Journal of Structural Engineering**.v. 138, p. 687–696, 2012 b.

BEUSHAUSEN, H.; TORRENT, R.; ALEXANDER, M. G. Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs. **Cement and Concrete Research**, v. 119, p. 11–20, 2019.

BOUGEARD, D.; SMIRNOV, K. S.; GEIDEL, E. Vibration Spectral and Structure Kaolinite: A Computer Simulation Study. **The Journal of Physical Chemistry B**. v. 104, pag 9210-9217, 2000.

BORGES, P.H.R. **Caracterização microestrutural do cimento Portland branco**. Belo Horizonte: UFMG, 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 2002.

BRACKIN, M. E., *et al.* Impact Forces from Heavy-Vehicle Collisions with Bridge Piers. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**. v. 2313, p. 42–51, 2012.

CARMONA, I. N. *et al.* Caracterização química e mineral de feições de solos tipo TPA da região do Salobo (Província Mineral de Carajás, Pará). In: **Congresso brasileiro de ciência do solo**, 35., Natal. Anais...Natal: UFOPA, 2015.

CAMPOS, V. C.; *et.al.* Inspeção de uma ponte de acordo NBR 9452, na cidade de PALMÁSIO: **Análise Das Manifestações Patológicas**. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, Ed. 02, Vol. 02, p. 98-109, fevereiro de 2018.

CALÇADA, R. J. G. **Estudo de erosões localizadas causadas por pilares com geometria complexa**.138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Nova de Lisboa, 2012.

CARDOSO, R. A. F. **Infraescavação em pilares de pontes**.90 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.

CARP, O.; HUISMAN, C.L.; RELLER, A. Photoinduced reactivity of titanium dioxide. **Progress in Solid State Chemistry, Bucharest**. v. 32, n. 1, p. 33-177, 2004.

CASCUDO, O.; PIRES, P.; CARASEK, H. *et al.* Evaluation of the pore solution of concretes with mineral additions subjected to 14 years of natural carbonation. **Cement And Concrete Composites**, v. 115, p. 103858-13, January. 2021.

CONTRERAS-NIETO, C.; SHANB, Y.; LEWIS, P.; HARTELL, J. A. Bridge maintenance prioritization using analytic hierarchy process and fusion tables. **Automation in Construction**, v. 101, p.99-110, 2019.

CORDEIRO, J. G. P. **Aparelhos de apoio em pontes vida útil e procedimentos de substituição**. 161 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil Perfil de Estruturas, Departamental de Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.

CHEEN, J.J.; THOMAS, J.J.; JENNINGS, H.M. Decalcification shrinkage of cement paste. **Cement and Concrete Research**. v. 36 p. 801–809, 2006.

CHENG, H.; LIU, Q.; YANG, J.; FROST, R. L. Thermogravimetric analysis of selected coal-bearing strata kaolinite. **Thermochimica Acta**, v. 507- 508, 84-90, 2010a.

CHEN, J.; QIAN, C.; SONG, H. A new chemo-mechanical model of damage in concrete under sulfate attack. **Construction and Building Materials**.v. 115, p.536–543 2016.

CHEN, G.; LV, Y.; ZHANG, Y. *et al.* Carbonation depth predictions in concrete structures under changing climate condition in China. **Engineering Failure Analysis**, v. 119, p. 104990, October. 2021.

CHU, I.; LEE, Y.; AMIN, M. N.; *et al.* Application of a thermal stress device for the prediction of stresses due to hydration heat in mass concrete structure. **Construction and Building Materials**. v. 45, p. 192–198. 2013.

CHAMECKI, S. Curso de Estática das Construções – Vol. I – pág. 190 e 191 - Editora Científica – RJ – 1956 – citado em revista ESTRUTURA - No 1 – Outubro 1957.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Norma DNIT 010/2004 – PRO – Inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido - procedimento. Rio de Janeiro, 2004b. 18p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro, 2019. 48p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. NORMA DNIT 090/2006 – Patologias do concreto – Especificação de serviço - procedimento. Espírito Santo, 2006. 10p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Manual de Recuperação de Pontes e Viadutos rodoviários. Rio de Janeiro, 2010. 159p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Diretoria Geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de Manutenção de Obras de Arte Especiais – OAEs. 1. Ed. Brasília D.F, 2016. 102 p.

DEVI, S. V. Durability properties of multiple blended concrete. **Construction and Building Materials journal**. v. 179, p. 649-660, June 2018.

DHAMAL, S.; WADEKAR, M.; KULKARNI, B. A. *et al.* Chemical Investigations of Some Commercial Samples of Calcium Based Ayurvedic Drug of Marine Origin: Kapardika Bhasma. *Journal of Pharmacy and Biological Sciences*. v. 6, p. 05-12, 2013.

DIAMOND, S. The microstructure of cement paste and concrete — a visual primer. **Cement and Concrete Composites**. V. 26, Issue 8, , p. 919-933, 2004.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method, English version, DIN. Berlin, 2007. 10 p.

DO, T. V.; PHAM, T. M.; HAO, H. Dynamic responses and failure modes of bridge columns under vehicle collision. **Engineering Structures**. v.156, p. 243-259,2018.

DYER, T. **Concrete Durability**.1. ed. New York: Ed Crc Pres 2014.447p.

ENGEPLUS. Disponível em < <http://www.engeplus.com.br/noticia/transito/2019/duplicacao-da-br-101-tem-48-pontes-em-operacao>> acesso em: 01/12/2019.

FARIÑAS, J. C.; ORTEGA, P.; Analisis 1992, 20, 221.

FELIX, E, F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis. **Construction and Building Materials**, v. 266, p. 121050, January. 2021.

FERRARESI, T. M.; SILVA, W T. L.; MARIN NETO, L.; *et al.* espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Cimento e solo**, v. 36, p 1769-1777. 2012.

FERRÃO, A. M. A.; PAULON, M. A.; CAMPOS, V. A. Reaproveitamento de resíduos de isoladores elétricos de porcelana como adição pozolânica em argamassas. 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica 15 a 18 de maio de 2016, Águas de Lindóia, SP.

FRIOLO, K. H.; STUART, B.; RAY, A. Characterisation of weathering of Sydney sandstones in heritage buildings. **Journal of Cultural Heritage**. V. 4, pag 211-220, 2003.

FONSECA, G. M. Rochas ultramáficas plutônicas do greenstone belt Rio das Velhas na porção central do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geociências**. V. 66(1), p. 67-75, 2013.

FOWLER, D. E. The findings of an empirical study of the application of criminal law in non-terrorist disasters and tragedies 2017. **Futures**. v. 102, p. 134-145, September 2018.

GLASSER, F. P. Thermodynamics of Cement Hydration - Entalpia de Hidratação dos compostos do Cimento - Materials Science of Concrete VII – 2005 - The American Ceramic.

GIRALDO, J. M. G.; GIRALDO, J. O; GOMES, E. A. G. La infraestructura de puentes em las vias secundarias del departamento de antioquia. **EIA**. v.11, n. 22, p. 119-131, Diciembre 2014.

GOMES; C; MONTEIRO, E.; VITÓRIO, A. Um estudo sobre a degradação estrutural de pontes e viadutos rodoviários. **In: CINPAR 2017 / XIII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, 2017 Ceará. Anais...** Ceará, 2017, p 67- 82.

GROVES, G. W., RODWAY. D. I. RICHARDSON, I. G. The carbonation of hardened cement pastes. **Advances in Cement Research**.v. 3 p. 117–125 1990.

GUNEYISI, E.; GESOGLU, M.; OZBAY, E. Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. **Construction and Building Materials**. V.24, p. 1878-1887 October 2010.

HAILE, T.; ALLOUCHE, G. N. E. Evaluation of the resistance of mortars coated with silver bearing zeolite to bacterial-induced corrosion. **Corrosion Science**. V.50, p. 713–720, March 2008.

HARUTYNYAN, V. S.; ABOVYAN, E. S.; MONTEIRO, P. J. M. *et al.* X-ray Diffraction Investigations of Microstructure of Calcium Hydroxide Crystallites in the Interfacial Transition Zone of Concrete. **Journal of the American Ceramic Society homepage**. V. 86, p. 2162-2166, 2003.

HELENE, P. R. L. Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. 1993. 231p. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.

HELLEBOIS, A.; LAUNOY, A.; CHRISTIAN, P.; DE LANÈAVE, M., *et al.* 100-year-old hennebique concrete, from composition to performance. **Construction and Building Materials**.v.44, p.149–60,2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.017>.

HERZ, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. **Geological Survey Professional Paper**, 641-B:1-58.

HERJNDEZ, S., GUERRERO, A.; GONI, S.: Proceedings of the International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management “Spectrum 96” 133, 1996.

HUGHES, T. L.; METHVEN.C.M; JONES T.G.J.; PELHAN, S.E.; FLETCHER, P ; HALL, C. Determining Cement composition by Fourier transform Infrared Spectroscopy. **Advanced Cement Based Material**. v. 2, n 3, p 91-104, 1995.

HOBAS – Disponível em < <http://www.hobas.com.br/aplicacoes/sistemas-de-drenagem/drenagem-de-pontes.html>> acesso em: 01/12/2019.

HUO, S. X.; WONG, L. U. Experimental study of early-age behavior of high performance concrete deck slabs under different curing methods. **Construction and Building Materials**.v.20, p. 240-252, December 2006.

HÜTHWOHL, P.; BRILAKIS, I; BORRMANN, A; *et al.* Integrating RC Bridge Defect Information into BIM Models. **Journal of Computing in Civil Engineering**, p. 1-14, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO IBRACON - IBRACON. Seminários sobre riscos e acidentes estruturais em obras de engenharia civil. Casos de colapsos estruturais em pontes, viadutos e passarelas. p. 42. Recife, 12 de novembro de 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: frota de veículos. 2018a. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/rio-acima/pesquisa/22/28120>> acesso em: 15 de January de 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: frota de veículos. 2018b. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/santa-luzia/pesquisa/22/28120>> acesso em: 15 de January de 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: frota de veículos. 2018c. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/belo-vale/pesquisa/22/28120>> acesso em: 15 de January de 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: população. 2020a. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/rio-acima.html>> acesso em: 15 de January de 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: população. 2020b. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/santa-luzia.html>> 15 de January de 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e estados: população. 2020c. Disponível em <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/belo-vale.html>> acesso em: 15 de January de 2021.

ILUMINAÇÃO PONTE EM FLORIANOPOLIS- Disponível em <<http://wp.clicrbs.com.br/visor/2013/06/05/o-novo-modelo-de-iluminacao-das-pontes-de-florianopolis/?topo=67,2,18,,67>> acesso em: 01/02/2020.

WANG, X-H.; VAL, D, V.; ZHENG, L. *et al.* Carbonation of loaded RC elements made of different concrete types: accelerated testing and future predictions. **Construction And Building Materials**, v. 243, p. 118259-14, May. 2020.

WITKOWSKI, H.; KONIORCZYK, M. The influence of pozzolanic additives on the carbonation rate and Life Cycle Inventory of concrete. **Construction And Building Materials**, v. 254, p. 119301-9, September. 2020.

JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J.F. Hydration of Portland cement. In: BARNES, P., Structure and performance of cements. London: **Applied Science Publishers**. cap. 6, p. 237-317, 1983.

JORNAL NORDESUL. Disponível em < <http://www.jornalnortesul.com.br/transito/pontes-e-viadutos-tomam-forma-nas-obras-da-br-285-rs-sc-1.1997959>> acesso em: 01/12/2019.

JANOTKA, L.; MADEJOVÁ, J.; STEVULA, L.; FRET'ALOVÁ, D.M. Behavior of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the presence of the set styrene-acrylate dispersion. **Cement and Concrete Research**. v. 26,n 11, p 1727-1735,1996.

JOHN, D.. St.; POOLE, A. W.; SIMS, I. Concrete Petrography – A handbook of investigative techniques – First edition 1998 - Arnold - John Wiley – New York.

KAZEMI, M. MADANDOUST, R. BRITO, J. Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing. **Construction and Building Material**. v. 224. p. 630-638. November. 2019.

KIP, N.; VEEN, J. A V.. The dual role of microbes in corrosion. **The ISME Journal**. v. 9.p. 542–551, 2015.

KUMAVAT, H.R. CHANDAK, N.R. PATIL, I.T. Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review. **Case Studies in Construction Materials**. v.14, p. e00491. June. 2021.

KHORSHIDI, N.; AZADMEHR, A. Characterisation and adsorption properties of oxalate-loaded hematite composite for Cd(II) and Pb(II) adsorption: Equilibrium models, thermodynamic and kinetic studies. **Separation Science and Technology**. v. 51, NO. 13, p. 2122–2137, 2016.

KOVLER, K. WANG, F. MURAVIN, B. Testing of concrete by rebound method: leeb versus Schmidt hammers. **Materials and Structures**. v.51, p. 138. October. 2018.

KUTLÁKOVÁ, K. M.; TOKARSKÝ, J.; KOVÁR, P.; *et al*. Preparation and characterization of photoactive composite kaolinite/TiO₂. **Journal of Hazardous Materials**. v. 188, 212-220, 2011.

KUMERDARSHAN, P., McCarthy, G. J., Hassett, D. J., Pflughoeft-Hassett, D. F.: Mater Res Soc Symp Proc 178, 106, 1990.

LEA, F.M. **The Chemistry of Cement and Concrete**. 3. ed. Ed. Arnold: Londres, 1970.

LI, S.; ZHU, S.; XU, Y.; *et al* . Long-term condition assessment of suspenders under traffic loads based on structural monitoring system: application to the Tsing Ma Bridge. **Struct. Control Health Monit**. v. 19, p. 82–101. February 2012.

LI, Q.; LI, K.; ZHOU, X.; *et al*. Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong–Zhuhai–Macau sea link project. **Structural Safety** . v. 53 p. 1-12 2015.

LI, K.; ZHANG, D.; LI, Q.; *et al* .Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond. **Cement and Concrete Research**. China, August 2018.

- LI, B.; JIANG, Z.; JIN, N. et al. Carbonation process simulation for cement-based materials based on microstructure by a cement hydration model. **Construction and Building Materials**, v. 259, p. 120429-11, August. 2020.
- LIU, P.; YU, Z.; CHEN, Y. Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment. **Cement And Concrete Composites**, v. 114, p. 103736-16, November. 2020.
- LOPES, L.; ATTANAYAKE, U. Evaluation of safe passage alternatives for non-motorized traffic across an existing highway bridge. **Sustainable Cities and Society**.v. 26, p.161-169.June 2016.
- LOPRECIPE, G.; MORETTI, L., CASTISANI, G.; *et at.* Prioritization methodology for roadside and guardrail improvement: Quantitative calculation of safety level and optimization of resources allocation. **ScienceDirect**.v. 5, p. 348-360. July 2018.
- MAES, M; BELIE, N. D. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate, Cem. **Cement and Concrete Composites**. v. 53, pages 59-72, October 2014.
- MAGALHAES, A. G..**Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**.238 f. Tese (Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte,2007.
- MAGALHÃES, A. G.; SILVA, F. J.; REZENDE, M. A. P. et al. The Influence of the Water/Cement Ratio in the Open Porosity and in the Carbonation Front Advancing in Cementitious Matrix Composites. **Applied Mechanics and Materials**, vol. 864, p. 313–317, April. 2017.
- MARTINS, J. V. ; GARCIA, D. C. S. ; AGUILAR, M. T. P. ; SANTOS, White José dos . Influence of replacing Portland cement with three different concrete sludge wastes. **Construction and Building Materials**. v. 303, p. 1-13, 2021.
- MARUYAMA, I.; SASSANO, H.; LIN, M. Impact of aggregate properties on the development of shrinkage-induced cracking in concrete under restraint conditions. **Cement and Concrete Research**. v. 85 82–101, 2016.
- MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. **IBRACON**. Cap. 22, 2011.
- MEENA Devi, P. NAGENDRA, P.; . KALIRAJAN, K.. Infrared spectral studies on siddha drug-Pavalaparpam. **International journal of pharma and biosciences**. V. 1(4), p. 474-483, 2010.
- MELVILLE, B. W., COLEMAN, S. E. **Bridge Scour**, Water Resources Publications, LLC, Colorado, 2000.
- MENDES, V. A. **Estudo comparativo das propriedades mecânicas e estruturais de blocos de concreto produzidos com brita ou seixo rolado**.59 f. Monografia (Graduação do curso

de Engenharia Química) – Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de Lorena- EEL-USP, São Paulo, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1ª ed. São Paulo: PINI, 1v. p. 573,580, 1994.

METHA, P. K.; BURROWS, R. W. **Building durable structures in the 21st century** . The Indian Concrete Journal. July 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto Microestrutura, Propriedade e Materiais – 3ª edição. Ed.: **IBRACON**. ISBN.: 978-85-98576121. Português, p. 674, 2008.

MOON, J. H. **Cracks Everywhere: How the Seongsu Bridge Collapse Changed Seoul's Urban Personality**. 51 f. May 18, 2011.

MANOHARAN, C.; SUTHARSAN, P.; DHANAPANDIAN, S.; VENKATACHALAPATHY, R. Spectroscopic and thermal analysis of red clay for industrial applications from Tamilnadu, Índia. **Journal of Molecular Structure**. v. 1027, 99-103, 2012.

MOLLAH, M. Y. A.; LU, F e COCKEL. D. L. An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) investigation of the long-term effect on the solidification/stabilization (S/S) of arsenic(V) in Portland cement type-V. **The science of the total environment**. v. 224, p. 57-68, 1998.

MOTHÉ, L. P. **Avaliação das condições ideais para a produção de metacaulinita através da análise da sua atividade pozolânica**. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2004.

MUHAMMAD, N. Z ; SHAFAGHAT, A; KEYVANFAR, A. *et al*. Tests and methods of evaluating the self-healing efficiency of concrete: a review. **Construction and Building Materials**. V. 112, pages 1123-1132, June 2016.

NAGARAJAIAH, S.; ERAZOA, K. Structural monitoring and identification of civil infrastructure in the United States. **Structural Monitoring and Maintenance**. v. 3, No. 1, pages 51-69, March 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**; Trad. GIAMUSSO, S. E. 2. ed. São Paulo, Pini, 1997.

NEVILLE, A.M. Cement and Concrete: Their Interrelation in Practice - Advances in Cement and Concrete - Editors: Michael W. Grutzeck and Shondeep L. Sarkar. – **American Society of Civil Engineers**. 1994.

NEVILLE, A. M. **Properties of Concrete**. Longman Scientific e Technical John Wiley e Sons, Harlow, New York, 2008.

NETO, M. L. W. 5º Inventário Municipal de Emissões de Gee Relatório Técnico de atualização dos dados. Prefeitura de Belo Horizonte, 2021.

NOBRE, T. R. S. Reidratação de pastas de cimento Portland desidratadas. **In:** Anais do 7 Congresso Brasileiro do Cimento, São Paulo. 20 a 22 junho 2016.

O'BRIEN, E.J.; BORDALLO-RUIZ, A.; ENRIGHT, B. Lifetime maximum load effects on short-span bridges subject to growing traffic volumes. **Structural Safety**. v. 50, p. 113–122, May 2014.

OLIVEIRA, T .R. **Análise da frente de carbonatação em concreto convencional: estudo de caso em edificações com diferentes idades no município de Juazeiro do Norte-Ce**. 52 f. Monografia (Curso de Tecnologia da Construção Civil com habilitação em Edifícios) - Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte – CE, 2017.

PASUPATHY, K.; BERNDT, M.; SANJAYAN, J; *et al.* Durability of low-calcium fly ash based geopolymer concrete culvert in a saline environment. **Cement and Concrete Research**. v. 100, pages 297-310, October 2017.

PANZERA, T. H. *et al.* Propriedades Mecânicas de Materiais Compósitos a Base de Cimento Portland e Resina Epóxi. **Cerâmica**. São Paulo, v. 56, n. 337, p. 77-82, Mar. 2010.

PENG, L.; STEWART, M. G. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China. **Structure and Infrastructure Engineering**. v. 12, p.499–516,2014. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.858270>.

PHILLIPSON, M. C.; EMMANUEL, R.; BAKER, P. H. The durability of building materials under a changing climate. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**.v. 7(4), p. 590–599 ,2016. doi:10.1002/wcc.398.

PLASSAIS, A. **Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments**.167 f. (THÈSE de DOCTORAT, Spécialité : Physique et chimie des matériaux) - Université Paris , França, 2003.

PLASSAIS, A. **Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments**.167 f. (THÈSE de DOCTORAT, Spécialité : Physique et chimie des matériaux) - Université Paris , França, 2004.

PCA - Portland Cement Association - 2008 – U.S. and Canadian Cement Characteristics 1950-2004. - Research & Development Information - PCA R&D SN2879 – Javed I.Bhatty & Paul D. Tennis.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.

PELISSER, G. O. **Síntese e caracterização de nanocompósitos de silicato de cálcio hidratado-Polímeros**.176 f. (Tese de doutorado Engenharia Civil, área de Concentração em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2010.

PETER, M. A.; MUNTEAN, A; MEIER, S.A. *et al.* Competition of Several Carbonation Reactions in Concrete: a parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385-1393, 2008.

POORARBABI, A. GHASEMI, M. MOGHADDAM, M. Concrete compressive strength prediction using non-destructive tests through response surface methodology. **Ain Shams Engineering Journal**. v. 11, p. 939-949. December. 2020.

QIANGS, W; PEIYU, Y.; JIANWE, Y. *et al.* Influence of steel slag on mechanical properties and durability of concrete. **Construction and Building Materials**. v.47, p. 1414-1420, October 2013.

QI, M.; LI, J.; CHEN, Q. Comparison of existing equations for local scour at bridge piers: parameter influence and validation. **Natural Hazards**. V. 82(3), p. 2089–2105, (2016).

RAMACHANDRAN, D.; UTHAMAN, S.; VISHWAKARMA, V. Studies of carbonation process in nanoparticles modified fly ash concrete. **Construction And Building Materials**, v. 252, p. 119127-10, August. 2020.

HERZ, N.. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey Professional. p.641-B:1-58, 1970.

RESENDE, G. O. **Manifestações patológicas em pontes de concreto nas proximidades do município de Arcos - MG**. 60 f. (Monografia Engenharia Civil, Curso de engenharia Civil) - Centro Universitário de Formiga - UNIFOR, Formiga, 2018.

REIG, F. BOSCH; ADELANTADO, J. V. G.; MORENO, M. C.M. M. FTIR quantitative analysis of calcium carbonate (calcite) and sílica (quartz) mixtures using the constant ratio method. **Application to geological samples**. TALANTA. v. 58, p. 811-821, 2002.

RODRIGUES, P. N. **Caracterização das argamassas históricas da ruína de São Miguel Arcanjo/RS**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

ŠAVIJA, B.; LUKOVIC', M. Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. **Construction and Building Materials**.v.117, p. 285-301, April, 2016.

SINAENCO - SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS DE ARQUITETURA E ENGENHARIA CONSULTIVA - Infraestrutura de Minas Gerais: Prazo de validade vencido, p. 25, 2016.

SAIKIA, N. J.; BHARALI, D. J.; SENGUPTA, P.; BORDOLOI, D. GOSWAMEE, R. L. SAIKIA, P.C.; BORTHAKUR, P. C. Chacterization, beneficiation and utilization of a Kaolin-ite clay from Assam, India. **Applied Clay Science**, V. 24, pag 93-103,2013.

SEVELSTED, T.F.; SKIBSTED, J. Carbonation of C–S–H and C–A–S–H samples studied by ¹³C, ²⁷Al and ²⁹Si MAS NMR spectroscopy. **Cement and Concrete Research**. v. 71, p. 56–65, 2015.

STEWART; G.M; WANG, X., NGUYEN, M. N. Climate change adaptation for corrosion control of concrete infrastructure. **Structural Safety**.v. 35, p. 29–39, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.10.002>.

SINGH, N. SINGH, S.P. Evaluating the performance of self-compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using nondestructive testing techniques. **Construction And Building Materials**, v. 181, p. 73-84, August. 2018.

SHEN, D.; JIANG, J.; WANG, F.; *et al.*, Tensile creep and cracking resistance of concrete with different water-to-cement ratios at early age. **Materiais de Construção e Construção**. v. 146, p. 410–418, 2017.

SHI, J.; WU, M.; MING, J. Degradation effect of carbonation on electrochemical behavior of 2304 duplex stainless steel in simulated concrete pore solutions. **Corrosion Science**, v. 177, p. 109006-18, December. 2020.

SOUZA, H.; BENTO, J.; FIGUEIRAS, J. Construction assessment and long-term prediction of prestressed concrete bridges based on monitoring. **Engineering Structures**. v. 52, p. 26–37, March 2013.

SOUZA, A. T.; CARVALHAIS, C. A.; SANTOS, W. J.S. Analysis of chemical admixtures combination on coating mortar using Simplex network method. **Construction and Building Materials**. v. 239, p. 117796, 2020.

SNOECK, D.; HEEDE, P. V. d.; MULLE, T. V.; *et al.*, Water penetration through cracks in self-healing cementitious materials with superabsorbent polymers studied by neutron radiography. **Cement and Concrete Research**. v.113, p. 86-98. November 2018.

SUGAMA, T.; KUKACHA, L. E.: *Cement and Concrete Research* 12, 789, 1982.

SKYSCRAPERCITY, Municípios metropolitano de Belo Horizonte (2019), Disponível em <<https://www.skyscrapercity.com/threads/regi%C3%A3o-metropolitana-de-belo-horizonte-mg.2136004/>> acesso em: 12/08/2021.

SZILÁGYI, K.; BOROSNYÓI, A.; ZSIGOVICS, I. Rebound surface hardness of concrete: Introduction of an empirical constitutive model. **Construction and Building Materials**, vol. 25, no. 5, p. 2480–2487, December, 2011.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry Academic Press**.p. 126, London UK, 1990.

TANG, S.W.; YAO, Y.; ANDRADE, C.; LI, Z.J. Recent durability studies on concrete structure Review. **Article Cement and Concrete Research**. v. 78, p. 143-154, December 2015.

TENG, L.; HUANG, R.; CHEN, J.; *et al.* A Study of Crystalline Mechanism of Penetration Sealer Materials. **Materials**, v. 7, p. 399-412, January 2014.

TRB (Transportation Research Board). Public health and transportation: innovation, intervention, and improvements. **TR news**, No. 299. Washington 2015.

THE MANUAL FOR BRIDGE EVALUATION- **MBE - AASHTO T.O.S.o. Bridges**. Washington, DC, p. 41, 2011.

THIERY, M. *et al.* Investigation of the Carbonation Front Shape on Cementitious Materials: effects of the chemical kinetics. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1047- 1058, 2007.

THOMAZ, Eduardo C. S. Cimentos e Concretos 1900 – 2008. Notas de aula, p.57.2008.

TREACY, M. A.; BRUHWILER, E. A direct monitoring approach for the fatigue safety verification of construction joint details in an existing post-tensioned concrete box-girder bridge. **Engineering Structures**, v.88, p. 189-202, April 2015.

TRIGO, A. P. M. **Estudo da dopagem de agregados para finalidades de uso em concretos estruturais**.295 f. Tese (Doutorado programa de pós-graduação em Área de Concentração Engenharia de Estruturas) – Escola de engenharia de são Carlos, São Paulo,2012.

TRN'K, A.; SCHEINHERROVA', L.; MEDVED', I. *et al.* Simultaneous DSC and TG analysis of high-performance concrete containing natural zeolite as a supplementary cementitious material. **J Therm Anal Calorim**, 2015.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. Dosagem dos concretos de cimento Portland. **In: ISAIA, G. C. (Org.). Concreto: ciência e tecnologia, IBRACON: 2011.**

UGIONI, V. M.; GODINHO, DAIANE; S. S. **Análise das propriedades mecânicas do concreto produzido com substituições parciais e totais dos agregados graúdos e miúdos por agregados reciclados**. UNESC- Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

VALEC, Projeto de OAEs.2015. Disponível em < http://www.valec.gov.br/download/normastecnicas/especificacoes_de_projeto> acesso em: 28/10/2019. 41 p.

VAYAS, L.; ARISTIDIS, L. **Design of steel-concrete composite bridges to Eurocodes**. New York, 2014.

VASCONSELOS, F. O. **Análise das manifestações patológicas em pontes de concreto armado**. 71 f. (Monografia Engenharia Civil, Curso de engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2018.

VEDALAKSMI, R; RAJ, S. A.; SRINIVASAN, S; BABU, G. K. Quantification of hydrated cement products of blended cements in low and medium strength concrete using TG and DTA technique. **Thermochimica Acta**.v. 407. p.49-60. 2003.

VERDECI, T. B.; SOUZA, D. J.; RÉUS, G. C; *et. al.* Estudo de caso de previsão de vida útil de pontes e viadutos na região de Curitiba pelo método da Resistividade Elétrica e do Potencial de corrosão.In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, FOZ DO IGUAÇU, 2015, Paraná. **Anais...** Paraná: ENACOR, 2015.

VÖLKER, C; SHOKOUHI, P. Multi sensor data fusion approach for automatic honeycomb detection in concrete.**NDT&E International**.v.71, p.54–60, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.01.003>.

ZHOU, X.; ZHANG, X. Thoughts on the Development of Bridge Technology in China. **Engineering**, v. 5, p.1120-1130, January 2019.

VERLY, R. C. **Avaliação de metodologias de inspeção como instrumento de priorização de intervenções em obras de arte especiais.** 178 f. (Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-015A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

VLCEKI, P.; KONCICKY, J. Water impact reduction on the deck of the bridge structure by using complete drainage installation. **Procedia Engineering.** v.40, p. 487-491, July 2012.

VITÓRIO, J. A. P. **Pontes rodoviárias: fundamentos, conservação e gestão.** Recife. 1 ed. P Conselho Regional de Engenharia Arquitetura e Agronomia de Pernambuco –CREA-PE, Pernambuco, 2002.

VITÓRIO, J. A. P. **Acidentes estruturais em pontes rodoviárias: Causas, diagnósticos e soluções.** II Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2007.

VITÓRIO, J. A. P. Reforço de fundações de pontes e viadutos rodoviários. **IBRACON Instituto Brasileiro do Concreto Seminário Pernambucano de Estruturas de Fundações.** Recife, 2014.

VITÓRIO, J. A. P. **Danos e Acidentes Estruturais Causados pela Erosão e pelas Cheias nas Fundações e nos Aterros de Acesso de Pontes Rodoviárias.** IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro, 2016.

WANG, X. Y.; LEE, H. S. A Model for Predicting the Carbonation Depth of Concrete Containing Low-Calcium Fly Ash. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 725-733, 2009.

WANG, X-H.; VAL, D, V.; ZHENG, L. *et al.* Carbonation of loaded RC elements made of different concrete types: accelerated testing and future predictions. **Construction And Building Materials**, v. 243, p. 118259-14, May. 2020.

WEI, S.; SANCHEZ, M.; TREJO, D; GILLIS, C. Microbial mediated deterioration of reinforced concrete structures. **International Biodeterioration & Biodegradation.** v. 64, p. 748-754, December 2010.

WEI, S.; JIANG, L.; LIU, H; *et al.* Microbiologically induced deterioration of concrete - a review. **Brazilian Journal of Microbiology.** v.44, p. 1001-1007,2013.

WIKIWAND, disponível em <https://www.wikiwand.com/pt/Junta_de_dilata%C3%A7%C3%A3o> acesso em: 01/12/2019.

WU, W.; ZHANG, L., YANG, Z. *et al.* Study on microstructure of the Pinctada martensii pearls and its significance. **International Scholarly Research Network.** p. 9, 2012.

XU, F.; YANG, Z.; LIU, W. *et al.* Experimental investigation on the effect of sulfate attack on chloride diffusivity of cracked concrete subjected to composite solution. **Construction and Building Materials.** v.237, p. 1-9, 2019.

ZHANG, W.; ZAKARIA, M.; HAMA, Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. **Construction and Building Materials.** v. 49, p. 500–510, December 2013.

ZHANG, Q. Mathematical modeling and numerical study of carbonation in porous concrete materials, **Applied Mathematics and Computation**. v. 281, p. 16–27, 2016.

ZHANG, M.; ZHANG, W.; XIE, F. Experimental study on ASR performance of concrete with nano-particles. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**. v. 18, p.2-8, Apr 2019.

ZHANG, J.X.; LIANG, D.F.; FAN, X.; LIU, H. Detached eddy simulation of flow through a circular patch of free-surface-piercing cylinders. **Advances in Water Resources**.v. 123, p. 96-108, January 2019.

ZHANG, D.; YANG, Q.; MAO, M. *et al.* Carbonation performance of concrete with fly ash as fine aggregate after stress damage and high temperature exposure. **Construction And Building Materials**, v. 242, p. 118125-13, May. 2020.

ZHAO, G.;LI, J. ;SHI, M. *et al.* Degradation of cast-in-situ concrete subjected to sulphate-chloride combined attack.**Construction and Building Materials**.v.214, 2020.

ZHOU, X .Y; SCHMIDT, F.; TOUTLEMONDE, F; JACOB, B. Applying weigh-in-motion traffic data to reliability-based assessment of bridge structures. **in: Safety,Reliability, Risk and Life-Cycle Performance of Structures and Infrastructures**,CRC Press. , p. 3831–3838. London 2014.

ANEXO 1 - Sugestão para ficha descritiva da Obra de Arte Especial

FICHA DESCRITIVA DA OBRA DE ARTE ESPECIAL

Dados básicos			
Nome da OAE:		Data da inspeção: ___/___/___	
Cidade mais próxima:			UF: _____
Coordenadas GPS:	Altitude (m):	Latitude (S) (°)	Longitude (W) (°)
Localização (km):			
Natureza da transposição: <input type="checkbox"/> Ponte <input type="checkbox"/> Viaduto sobre rodovia <input type="checkbox"/> Viaduto sobre ferrovia <input type="checkbox"/> Passagem Inferior			
Sistema construtivo: <input type="checkbox"/> Moldado no local <input type="checkbox"/> Pré-moldado <input type="checkbox"/> Balanços sucessivos <input type="checkbox"/> Outro _____			
Comprimento (m):		Largura (m):	
Classe de Agressividade Ambiental (NBR 6118:2014): <input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input type="checkbox"/> III <input type="checkbox"/> IV			
Projetista:			
Construtor:			
Ano da construção:			
Características da região: <input type="checkbox"/> Plana <input type="checkbox"/> Ondulada <input type="checkbox"/> Montanhosa			
Traçado: <input type="checkbox"/> Tangente <input type="checkbox"/> Curvo			
Características dos vãos:			
Número de vãos: _____	Descrição dos vãos:		
Responsável pela inspeção:			
Nome:			
Formação:			
Empresa:			

Fonte: VERLY, (2015).