

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO MACIOSKI

APLICAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓTICA COM REDE DE BRAGG NA AVALIAÇÃO
DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

CURITIBA

2023

GUSTAVO MACIOSKI

APLICAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓTICA COM REDE DE BRAGG NA AVALIAÇÃO
DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, no Setor de Tecnologia, na Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo H. F. de Medeiros

Coorientador: Prof. Dr. Leandro F. M. Sanchez

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Macioski, Gustavo

Aplicação de sensores em fibra ótica com rede de Bragg na avaliação da reação álcali-sílica / Gustavo Macioski. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Marcelo Henrique Farias de Medeiros

Coorientador: Leandro F. M. Sanchez

1. Concreto. 2. Reações alcali-agregado. 3. Fotônica. 4. Durabilidade do material de construção. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. IV. Sanchez, Leandro F. M. . V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA CIVIL -
40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **GUSTAVO MACIOSKI** intitulada: **APLICAÇÃO DE SENSORES EM FIBRA ÓTICA COM REDE DE BRAGG NA AVALIAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 07 de Dezembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

11/12/2023 16:29:49.0

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

11/12/2023 10:59:03.0

EDUARDO PEREIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Assinatura Eletrônica

11/12/2023 15:52:40.0

TIBÉRIO WANDERLEY CORREIA DE OLIVEIRA ANDRADE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica

12/12/2023 17:36:32.0

VALMIR DE OLIVEIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3110 - E-mail: poscivil@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 332761

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 332761

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas contribuíram direta e indiretamente no desenvolvimento desta tese. Gostaria aqui de expressar meu reconhecimento e gratidão.

Ao meu orientador, professor Marcelo Medeiros, pela amizade, ensinamentos, conselhos e questionamentos. Agradeço a confiança depositada em mim, sua dedicação com esta pesquisa e a oportunidade de participar de tantos projetos ao longo destes anos.

Ao meu coorientador, professor Leandro Sanchez, por todas as contribuições feitas ao trabalho na avaliação da reação álcali-agregado. Agradeço também pela recepção e oportunidade de desenvolver parte de minha pesquisa na Universidade de Ottawa.

Aos pesquisadores da banca que auxiliaram na avaliação e correção deste trabalho, professores Valmir Oliveira, Eduardo Pereira, Tibério Andrade e Ricardo Perialisi, pela atenção e sugestões feitas. À professora Cristina Valle Pinto Coelho pelo auxílio na análise petrográfica do agregado.

Aos estudantes da UFPR, UTFPR e uOttawa, os quais não ousou citar nomes para não correr o risco de esquecer alguém, com os quais compartilhei minhas preocupações, aflições, descobertas e conquistas durante o percurso.

À minha esposa Nicolle, pela paciência, apoio e companheirismo. Obrigado por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis, por me trazer paz todos os dias, pela ajuda nos ensaios e revisões do texto desta tese.

Ao Programa Institucional de Internacionalização (PrInt) da UFPR e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro durante o período de doutorado sanduíche no Canadá.

Ao Laboratório Multiusuário de Fotônica (FOTON) e ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da UTFPR; ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LABMU) da UEPG; ao Laboratório de Pesquisa em Microscopia (LAPEM), ao Instituto Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (iLAMIR), ao Centro de Estudos em Engenharia Civil (CESEC) e ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) da UFPR pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos técnico-administrativos e professores destas instituições, que lutam diariamente para garantir um ensino gratuito de qualidade.

RESUMO

A reação álcali-silica (RAS) é um dos mecanismos mais nocivos que afetam as infraestruturas de concreto em todo o mundo. Vários parâmetros podem impactar o desenvolvimento da RAS, tais como: o tipo e a reatividade dos agregados, o teor de álcalis, a temperatura, a umidade, entre outros. Ao longo dos anos, diversas técnicas e procedimentos foram desenvolvidos durante as últimas décadas para realizar a avaliação da infraestrutura de concreto afetada pela RAS. Dentre elas, técnicas de monitoramento da saúde estrutural são consideradas as mais confiáveis para compreender a taxa de expansão ao longo do tempo e, portanto, prever o potencial dano em estruturas afetadas pelo mecanismo de degradação. Neste contexto, sensores em fibras óticas gravadas com redes de Bragg (FBG ou *Fiber Bragg Grating*) vêm ganhando maior atenção no mercado para aplicações na área de monitoramento estrutural. Estes sensores óticos possuem dimensão reduzida, baixa perda de sinal e alta precisão para medições de temperatura e deformação, quando comparado à sensores eletrônicos que possuem baixa durabilidade em ambientes agressivos. No entanto, a aplicação de FBG em concretos degradados é incipiente. Portanto, este trabalho visa avaliar a eficiência da FBG na determinação de deformações em comparação com outros sensores existentes no mercado, avaliar o potencial reativo de agregados devido à expansão de amostras de concreto afetadas por RAS em laboratório, e verificar a durabilidade do sensor e possíveis interferências no sinal. A partir dos resultados foi possível verificar a melhor forma de fabricação e calibração dos sensores, a versatilidade do uso da FBG na avaliação da RAS e verificar sua durabilidade para instrumentação de estruturas. Assim, seu uso permite uma melhor seleção de estratégias de reparo, garantindo a integridade de infraestruturas críticas como barragens, pontes, viadutos, túneis, passarelas e grandes edifícios.

Palavras-chave: Concreto; Durabilidade; Fotônica; Reação álcali-agregado.

ABSTRACT

Alkali-silica reaction (ASR) is amongst the most harmful mechanism affecting concrete infrastructure worldwide. Several parameters may impact on ASR induced development such as: the type and reactivity of the aggregates, the alkali loading, temperature, humidity, among others. Over the years, several techniques and procedures have been developed during the last decades to assess concrete infrastructure affected by ASR. Among them, structural health monitoring techniques are considered the most reliable to understand the expansion rate over time and predict the potential damage in structures affected by the degradation mechanism. In this context, fiber optic sensors inscribed with Bragg gratings (FBG or Fiber Bragg Grating) have been gaining more attention in the market for applications in structural monitoring. These optical sensors have small dimensions, low signal loss, and high temperature and strain measurement precision compared to electronic sensors with low durability in harsh environments. However, the application of FBG in degraded concrete is incipient. Therefore, this work aims to evaluate the efficiency of FBG for strain determination in comparison with other existing sensors in the market, to evaluate the reactive potential of aggregates due to the expansion of concrete samples affected by ASR in the laboratory, and to verify the durability of the sensor and possible interferences in the signal. The results showed the best way to manufacture and calibrate the sensors, the versatility of using FBG in evaluating the ASR, and its durability for structural instrumentation. Thus, its use allows for a better selection of repair strategies, ensuring the integrity of critical infrastructure such as dams, bridges, viaducts, tunnels, walkways, and large buildings.

Keywords: Concrete; Durability; Photonics; Alkali-aggregate reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 -	Registros da reação álcali-agregado no mundo	20
Figura 1.2 -	Fissuras devido à RAA em ponte localizada em Quebec City (Canadá).....	21
Figura 1.3 -	Publicações de artigos em periódicos na base Scopus sobre a reação álcali-agregado (a) por ano de publicação e (b) por país	22
Figura 1.4 -	Evolução da quantidade de ensaios de RAS realizados pela ABCP até 2016 no Brasil	23
Figura 1.5 -	Sistemas de instrumentação e tipos de deterioração	33
Figura 1.6 -	Número de (a) publicações e (b) patentes registradas sobre sensor FBG.....	35
Figura 1.7 -	Fluxograma com as etapas da pesquisa	37
Figura 2.1 -	Internet <i>backbone</i>	39
Figura 2.2 -	Reflexão total interna da luz no núcleo de uma fibra ótica	40
Figura 2.3 -	Componentes da estrutura da seção transversal de um cordão de fibra ótica	41
Figura 2.4 -	Seção transversal e modos de propagação em fibras óticas	41
Figura 2.5 -	Tipos de sensores em fibra ótica.....	43
Figura 2.6 -	Métodos de gravação de FBG utilizando máscara de fase por (a) iluminação direta e (b) interferometria	44
Figura 2.7 -	Interrogação de uma FBG durante a gravação a partir de sinais transmitidos e refletidos.....	45
Figura 2.8 -	Interrogação de uma FBG a partir de sinais transmitidos e refletidos	46
Figura 2.9 -	Espectros refletidos em fibras óticas com mesmo comprimento de onda: (a) monomodo e (b) multimodo.....	47
Figura 2.10 -	Encapsulamentos de FBG em tubos.....	51
Figura 2.11 -	Encapsulamento para medidas internas do concreto entre os pintos de ancoragem A e B.....	53
Figura 2.12 -	Encapsulamentos de FBG nas armaduras.....	53
Figura 2.13 -	Encapsulamentos de FBG em compósitos poliméricos	55
Figura 2.14 -	Exemplo de fixação de sensores em vigas armadas de concreto: (a) instrumentação e (b) leitura dos sensores	56
Figura 3.1 -	Ilustração do posicionamento dos elementos óticos	65
Figura 3.2 -	Arranjo experimental utilizado na gravação da FBG	66
Figura 3.3 -	Emenda de uma fibra ótica: (a) alinhamento do núcleo da fibra e (b) fusão por arco voltaico	67
Figura 3.4 -	Sistema de calibração de deformação específica para sensores FBG	67
Figura 3.5 -	Interrogador ótico utilizado na calibração	68

Figura 3.6 -	Posicionamento dos sensores utilizados na viga engastada em balanço	69
Figura 3.7 -	Colagem dos sensores na viga de argamassa: (a) FBG e (b) extensômetro ..	70
Figura 3.8 -	Exposição à luz UV para cura do polímero	70
Figura 3.9 -	Fluxograma dos sensores e propriedades avaliadas	74
Figura 3.10 -	Variação da intensidade da rede de Bragg durante o processo de gravação em diferentes fibras	75
Figura 3.11 -	Variação do comprimento de onda em função do (a) tempo de gravação e (b) da intensidade da rede de Bragg	76
Figura 3.12 -	Espectro refletido da rede de Bragg durante gravação com fibras (a) padrão e (b) padrão hidrogenadas	76
Figura 3.13 -	Simulação de FBG no <i>Grating Design Software</i>	77
Figura 3.14 -	Calibração do sensor FBG (a) série temporal e (b) ajuste linear.....	78
Figura 3.15 -	Carregamento FBG	80
Figura 3.16 -	Distribuição de tensões na viga por MEF	80
Figura 3.17 -	Estudo da sensibilidade da malha	80
Figura 3.18 -	Variação da deformação específica em função do carregamento.....	81
Figura 3.19 -	Módulo de elasticidade estático	82
Figura 3.20 -	Ensaio de vibração com acelerômetro (a) série temporal e (b) espectro de frequências.....	84
Figura 3.21 -	Ensaio de vibração com FBG (a) série temporal e (b) espectro de frequências	84
Figura 3.22 -	Ensaio de vibração com extensômetro (a) série temporal e (b) espectro de frequências.....	84
Figura 3.23 -	Ensaio de vibração com microfone (a) série temporal e (b) espectro de frequências.....	85
Figura 3.24 -	Frequências naturais de ressonância.....	85
Figura 3.25 -	Pontos utilizados no cálculo do amortecimento: (a) amplitudes da onda amortecida e (b) variação do coeficiente de amortecimento nas amostras.....	86
Figura 3.26 -	Coeficiente de amortecimento das amostras	87
Figura 3.27 -	Módulo elástico dinâmico	87
Figura 4.1 -	Representação do (a) quartzo cristalino e (b) quartzo amorfo após dissolução parcial da sílica.....	93
Figura 4.2 -	Representação da sílica em suspensão no gel de RAS.....	93
Figura 4.3 -	Produtos da RAS em amostra de concreto	94
Figura 4.4 -	Mecanismo da reação álcali-agregado no concreto	95
Figura 4.5 -	Ensaio SDT (a) amostra durante carregamentos e (b) aparato de fixação da amostra de concreto.....	104

Figura 4.6 -	Ensaio DRI (a) microscopia de seção polida e (b) identificação de fissura em agregado	105
Figura 4.7 -	Padrões de fissuração no concreto: (a) gelo-degelo, (b) etringita tardia, (c) RAS em agregado miúdo e (d) RAS em agregado graúdo	106
Figura 4.8 -	Posição geográfica da região de coleta das amostras	108
Figura 4.9 -	Fotografias da saibreira (a) visão da saída das esteiras e (b) perfil geológico	109
Figura 4.10 -	Preparo das lâminas delgadas, (a) coleta de amostra indeformada, (b) redução de amostra e definição da seção de análise e (c) lâmina polida	111
Figura 4.11 -	Detalhe das leituras de expansão: (a) inserção dos pinos após moldagem, (b) embutimento do pino com epóxi, (c) leitura de expansão em cilindros e (d) leitura de expansão em prismas	112
Figura 4.12 -	Sistema de calibração térmica com peltier	113
Figura 4.13 -	Detalhe da instalação dos sensores FBG em (a) agregados, (b) barras de aço, (c) agulha hipodérmica e (d) tubo capilar de inox.....	114
Figura 4.14 -	Imagem dos sensores FBG instalados em (a) agregados, (b) barras de aço, (c) agulha hipodérmica e (d) tubo capilar de inox.....	114
Figura 4.15 -	Detalhe da instalação do sensor FBG (a) na superfície das amostras, (b) sistema de proteção, (c) topo das amostras e (d) baldes na câmara	115
Figura 4.16 -	Ensaio SDT (a) fixação dos LVDT e (b) diagrama tensão deformação	117
Figura 4.17 -	Fluxograma dos sensores e propriedades avaliadas	120
Figura 4.18 -	Distribuição granulométrica dos materiais utilizados	122
Figura 4.19 -	Análise termogravimétrica (TG) do agregado (a) miúdo e (b) graúdo	123
Figura 4.20 -	Análise térmica diferencial (ATD) do agregado (a) miúdo e (b) graúdo	123
Figura 4.21 -	Identificação de fases cristalinas por DRX no agregado miúdo	124
Figura 4.22 -	Identificação de fases cristalinas por DRX no agregado graúdo	124
Figura 4.23 -	Fotomicrografia da amostra R1, com polarizadores cruzados	125
Figura 4.24 -	Fotomicrografias da amostra R2	126
Figura 4.25 -	Fotomicrografia da amostra R3	127
Figura 4.26 -	Porcentagem modal dos minerais	129
Figura 4.27 -	Expansão em amostras de concreto	130
Figura 4.28 -	Comparação do efeito de acúmulo de água em amostras (a) cilíndricas e (b) prismáticas	132
Figura 4.29 -	Avaliação da (a) variação de massa das amostras e (b) correlação com expansão.....	132
Figura 4.30 -	Variação da resistência à compressão ao longo do tempo	133
Figura 4.31 -	Porosidade das amostras cilíndricas (a) ao longo do tempo e (b) correlação com a resistência à compressão	134

Figura 4.32 - Diagramas tensão deformação obtidos durante ensaio SDT	135
Figura 4.33 - Parâmetros SDT e PDI obtidos no ensaio SDT.....	135
Figura 4.34 - Comparação dos resultados com análise global proposta por Sanchez et al. (2017b).....	136
Figura 4.35 - Resultado do (a) Módulo elástico obtido no ensaio SDT e (b) correlação com resistência	137
Figura 4.36 - Índice de dano e classificação de fissuras no ensaio DRI.....	138
Figura 4.37 - Micrografia de alterações nos agregados nas amostras aos 28 dias.....	138
Figura 4.38 - Micrografia de fissuras nos agregados aos 84 dias	139
Figura 4.39 - Micrografia de fissuras na pasta em idade avançada	140
Figura 4.40 - Micrografia de poros fissurados e preenchidos com produtos de reação	140
Figura 4.41 - Mapa de cores do índice de dano para cada quadrante das amostras.....	141
Figura 4.42 - Comparação dos resultados com análise global proposta por Sanchez et al. (2015b).....	142
Figura 4.43 - Calibração do sensor FBG para temperatura: (a) patamares de aquecimento na FBG nua e (b) ajuste lineares do coeficiente de calibração	144
Figura 4.44 - Aquisição de dados a partir de uma FBG: (a) comprimento de onda e (b) intensidade.....	145
Figura 4.45 - Variação térmica no interior das amostras	145
Figura 4.46 - Expansão medidas por FBG (a) na superfície e (b) no interior do concreto: argamassa, barra de aço e agregado	146
Figura 4.47 - Expansão medidas por pinos e FBG aos 365 dias.....	147
Figura 4.48 - Correlação entre leituras de expansão realizadas	147
Figura 4.49 - Micrografia de poros com gel gretado	150
Figura 4.50 - Mapa de cor dos elementos detectados por EDS	151
Figura 4.51 - Micrografia de poros com produto da RAS.....	152
Figura 4.52 - Micrografia do produto da RAS sobre agregados	152
Figura 4.53 - Micrografia de poros com etringita	153
Figura 4.54 - Diagrama ternário da composição química potencial do gel RAS em % atômica.....	154
Figura 4.55 - Relações em % atômicas do gel de RAS	154
Figura 5.1 - Vida útil de sensores em fibra ótica.....	159
Figura 5.2 - Sensores FBG imersos em solução agressiva.....	162
Figura 5.3 - Posicionamento de fibra ótica para verificação da seção em microscópio ótico.....	162
Figura 5.4 - Durabilidade dos sensores FBG em solução	164

Figura 5.5 -	Espectro do sensor FBG na solução A08 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)	165
Figura 5.6 -	Micrografia da fibra ótica após exposição em solução de hidróxido de cálcio	169
Figura 5.7 -	Número total de sensores FBG íntegros ao longo do tempo	169
Figura 5.8 -	Espectro refletido de sensor com perda súbita de sinal (argamassa)	170
Figura 5.9 -	Espectros refletidos de sensores FBG com interferência: (a) aço, (b) argamassa, (c) agregado e (d) temperatura.....	171
Figura 5.10 -	Cavidade Fabry-Perot (a) intrínseco e (b) extrínseco.....	172
Figura 5.11 -	Espectro normalizado de uma cavidade Fabry-Perrot de dimensões variando de 50 a 450 μm	173
Figura 5.12 -	Cavidade Fabry-Perot (a) associada à uma FBG e (b) seu espectro em reflexão	173
Figura 5.13 -	Exemplo de formação de cavidade devido à fissuração da amostra antes da FBG	174
Figura 5.14 -	Diferença de fase e comprimento das cavidades.....	175
Figura 5.15 -	Diferença de fase em função da temperatura da amostra	175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 -	Objetivos específicos da tese.....	28
Tabela 2.1 -	Propriedades da sílica utilizada em fibras óticas.....	40
Tabela 2.2 -	Estruturas instrumentadas com sensores óticos.....	58
Tabela 3.1 -	Estudos de monitoramento em estruturas.....	63
Tabela 3.2 -	Constantes para os modos vibracionais longitudinais em viga engastada.....	72
Tabela 4.1 -	Minerais e rochas suscetíveis à RAS.....	98
Tabela 4.2 -	Avaliação do potencial reativo da RAS em concretos e argamassas.....	100
Tabela 4.3 -	Classificação do grau de reatividade potencial do agregado.....	101
Tabela 4.4 -	Classificação do grau de ocorrência da RAS.....	101
Tabela 4.5 -	Classificação de dano multiparâmetro baseada nos ensaios SDT e DRI.....	106
Tabela 4.6 -	Dosagem do concreto.....	111
Tabela 4.7 -	Amostras instrumentadas para avaliação da RAS.....	116
Tabela 4.8 -	Característica de dano e fator empregado para a RAS.....	118
Tabela 4.9 -	Caracterização físico-química do CPV-ARI.....	121
Tabela 4.10 -	Composição química por FRX dos agregados utilizados.....	121
Tabela 4.11 -	Caracterização dos agregados miúdos e graúdos.....	122
Tabela 5.1 -	Soluções utilizadas para avaliação do sensor FBG.....	161
Tabela 5.2 -	Número de sensores FBG no início e fim do estudo.....	163
Tabela 5.3 -	Microscopia ótica de transmissão dos sensores FBG mantidos em solução.....	165

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AMBT	Ensaio acelerado em barras de argamassa (<i>accelerated mortar bar test</i>)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANOVA	Análise de Variância (<i>analysis of variance</i>)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATD	Análise térmica diferencial
CPT	Teste em prismas de concreto (<i>concrete prism test</i>)
CPV-ARI	Cimento Portland tipo V de alta resistência inicial
CRI	Categoria de Risco
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DPA	Dano Potencial Associado
DRI	Índice de classificação de danos (<i>damage rating index</i>)
DRX	Difração de raios X
DTG	Análise termogravimétrica diferencial (<i>differential thermogravimetry</i>)
DTSS	Sensor distribuído de temperatura e deformação em fibra ótica (<i>distributed temperature and strain sensing</i>)
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva (<i>energy dispersive spectroscopy</i>)
FBG	Rede de Bragg em fibra ótica (<i>fiber Bragg grating</i>)
FC/PC	Conector de ferrolho com contato físico (<i>ferrule connector with physical contact</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>fast Fourier transform</i>)
FPI	Interferômetro Fabry-Perot (<i>Fabry-Perot Interferometer</i>)
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (<i>Fourier-transform infrared spectroscopy</i>)
FWHM	Largura à meia altura (<i>full width at half maximum</i>)
ICAAR	<i>International Conference on Alkali-Aggregate Reaction</i>
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
ICP-AES	Espectroscopia de emissão atômica (<i>inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry</i>)
IR	Infravermelho (<i>Infrared</i>)

LASER	Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação (<i>light amplification by stimulated emission of radiation</i>)
LVDT	Transformador Diferencial Variável Linear (<i>linear variable differential transformer</i>)
MEF	Método dos elementos finitos
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de vinila
RAA	Reação álcali-agregado
RAC	Reação álcali-carbonato
RAS	Reação álcali-sílica
RILEM	<i>The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
RMN	Espectroscopia de ressonância magnética nuclear
RMS	Raiz do valor quadrático médio (<i>root mean square</i>)
SDT	Teste de dano da rigidez (<i>stiffness damage test</i>)
SHM	Monitoramento da saúde estrutural (<i>structural health monitoring</i>)
SSMF	Fibra monomodo padrão (<i>standard single mode fiber</i>)
UV	Ultravioleta
WDXRF	Espectrôscopia de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (<i>wavelength dispersive X-ray fluorescence</i>)

LISTA DE SIMBOLOS

a/c	Relação água/cimento [-]
A_0	Amplitude inicial da vibração [-]
A_n	Amplitude após n ciclos [-]
b	Base da seção [m]
D_n	Deformação específica da curva tensão-deformação [$m \cdot m^{-1}$]
E	Módulo de elasticidade estático [$N \cdot m^{-2}$]
E_d	Módulo de elasticidade dinâmico [$N \cdot m^{-2}$]
f_{ck}	Resistência característica do concreto [$N \cdot m^{-2}$]
f_n	Frequência natural de vibração para o modo vibracional “n” [Hz]
h	Altura da seção [m]
I	Momento de inércia [m^4]
K_T	Constante de calibração da temperatura em FBG [$^{\circ}C \cdot m^{-1}$]
K_{ε}	Constante de calibração da deformação específica em FBG [$m \cdot m^{-1} \cdot m^{-1}$]
k_n	Constante para o modo vibracional “n” [-]
L	Comprimento [m]
M	Massa linear [$kg \cdot m^{-1}$]
m	Massa [kg]
n	Número de ciclos da vibração [-]
n	Índice de refração [-]
n_{ef}	Índice de refração efetivo [-]
P	Carga aplicada [N]
S_n	Área sob a curva tensão-deformação [$N \cdot m^{-3}$]
SDI	Índice de dano da rigidez (<i>stiffness damage index</i>) [%]
PDI	Índice de deformação plástica (<i>plastic deformation index</i>) [%]
T_1	Fator de correção para o modo fundamental flexional [-]
V	Velocidade de propagação da onda [$m \cdot s^{-1}$]
α	Nível de significância estatístico [-]
α_{Λ}	Coefficiente termo ótico [$^{\circ}C^{-1}$]
α_E	Parâmetro em função da natureza do agregado [-]
α_n	Coefficiente de expansão térmica [$^{\circ}C^{-1}$]
δ	Deslocamento [m]

δ_{FPI}	Diferença de fase no comprimento de onda [m]
λ_b	Comprimento de onda de Bragg [m]
$\Delta\lambda_b$	Varição do comprimento de onda [m]
Δn	Modulação do índice de refração [-]
ΔT	Varição da temperatura [°C]
$\Delta\varepsilon$	Varição da deformação específica [m.m ⁻¹]
ε	Deformação específica ou expansão [m.m ⁻¹]
θ_c	Ângulo crítico de reflexão da luz [°]
Λ	Metade do período da máscara de fase [m]
ξ	Amortecimento [-]
ρ	Massa específica [kg.m ⁻³]
ρ_e	Constante fotoelástica [-]
ν	Coefficiente de Poisson [-]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	20
1.1.1	Panorama da RAS no Brasil	23
1.2	PROBLEMAS DA PESQUISA	25
1.3	OBJETIVO	27
1.4	JUSTIFICATIVA.....	28
1.4.1	Social.....	28
1.4.2	Ambiental.....	29
1.4.3	Econômica	30
1.4.4	Técnica	31
1.5	CARÁTER INOVADOR DA TESE	34
1.6	ESTRUTURA DA TESE.....	37
2	SENSOR EM FIBRA ÓTICA COM REDE DE BRAGG.....	39
2.1	FIBRA ÓTICA	39
2.2	SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓTICA	42
2.2.1	Redes de Bragg em fibra ótica (FBG).....	43
2.2.2	Calibração da FBG	48
2.3	ENCAPSULAMENTO DA FBG PARA USO EM CONCRETO.....	50
2.3.1	Encapsulamento em tubos metálicos longos.....	51
2.3.2	Fixação em barras metálicas	53
2.3.3	Embutimento em compósitos polímeros	54
2.4	APLICAÇÕES DA FBG NA ENGENHARIA CIVIL	56
3	FABRICAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SENSOR FBG	60
3.1	INTRODUÇÃO.....	60
3.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	64
3.2.1	Produção das vigas	64
3.2.2	Fabricação da FBG.....	65
3.2.3	Instrumentação e cálculos	68
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74

3.3.1	Gravação do sensor FBG em fibras óticas SSFM	74
3.3.2	Calibração do sensor FBG	78
3.3.3	Módulo estático	79
3.3.4	Módulo dinâmico	83
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
4	APLICAÇÃO DO SENSOR FBG NA AVALIAÇÃO DA RAS	92
4.1	INTRODUÇÃO	92
4.1.1	Cinética da reação álcali-sílica (RAS) e fatores influentes	92
4.1.2	Métodos de avaliação da expansão por RAS	100
4.1.3	Ensaio para diagnóstico da RAS	103
4.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	107
4.2.1	Seleção do agregado potencialmente reativo	107
4.2.2	Caracterização dos materiais	109
4.2.3	Dosagem do concreto	111
4.2.4	Leituras de expansão com pinos	112
4.2.5	Leituras de expansão com sensor FBG	113
4.2.6	Ensaio para avaliação de dano por RAS	116
4.2.7	Análise da microestrutura	120
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	121
4.3.1	Caracterização dos materiais	121
4.3.2	Expansão em concreto conforme NBR 15577-6	130
4.3.3	Ensaio para avaliação de dano por RAS	133
4.3.4	Monitoramento da RAS com sensor FBG	143
4.3.5	Análise da microestrutura	150
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	155
5	DURABILIDADE DO SENSOR FBG.....	159
5.1	INTRODUÇÃO	159
5.2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	160
5.2.1	Avaliação da durabilidade de sensores em solução	160
5.2.2	Avaliação da durabilidade de sensores em concreto	163
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	163

5.3.1	Avaliação da durabilidade de sensores em solução	163
5.3.2	Avaliação da durabilidade de sensores em concreto	169
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	177
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE	179
6.1	Conclusões gerais	179
6.2	Sugestão de trabalhos futuros	180
6.3	Publicações realizadas no período	181
	REFERÊNCIAS	185
	APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	216
	APÊNDICE B – DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS	225

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Obras de arte especiais como barragens, pontes, viadutos, passarelas e túneis compõem um acervo essencial no desenvolvimento das cidades e envolvem grande investimento público. Estas construções se deterioram com o passar do tempo e necessitam de serviços de conservação para não se tornarem vulneráveis às ações de agentes endógenos ou exógenos, que possam pôr em risco suas condições de estabilidade e funcionalidade (KHAN, 2010; LOURENÇO et al., 2009).

São diversos os mecanismos de degradação que podem agir na estrutura de concreto armado: carbonatação, entrada de agentes agressivos como íons cloreto e/ou sulfato, corrosão do aço, descolamentos excessivos de origem mecânica ou térmica, entre outros. Contudo, a reação álcali-agregado (RAA) é considerada uma das mais preocupantes porque ocorre de forma lenta, não há métodos eficientes para sua mitigação em estruturas existentes e possui maior ocorrência em estruturas de grande porte como pontes, viadutos, túneis e barragens (ISLAM; GHAFoori, 2018), ainda que possa ocorrer em obras residenciais, blocos de fundação e estruturas de contenção desde que existam condições favoráveis para a reação. De acordo com Sims e Poole (2017), a reação já foi reportada em todos os continentes como pode ser observado na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Registros da reação álcali-agregado no mundo



Fonte: Autoria própria, baseado em Sims e Poole (2017)

Em termos simples, a reação álcali-agregado no concreto é uma reação química entre a sílica amorfa ou metaestável presente em agregados (areia e brita) e íons presentes na solução de poros do concreto (OH^- , Na^+ e K^+), formando um gel que na presença de água torna-se expansivo (SIMS; POOLE, 2017). O mecanismo da reação é descrito de forma mais aprofundada no Capítulo 4 desta tese.

A expansão do gel aumenta as tensões internas do concreto e contribui com a diminuição do módulo de elasticidade, resistência à flexão e à compressão, além de ativar/intensificar outros processos de degradação do concreto devido à propagação de fissuras e facilitar a penetração de agentes agressivos (BLIGHT; ALEXANDER, 2011), como pode ser observado na Figura 1.2.

Figura 1.2 - Fissuras devido à RAA em ponte localizada em Quebec City (Canadá)



Fonte: SANCHEZ et al. (2017)

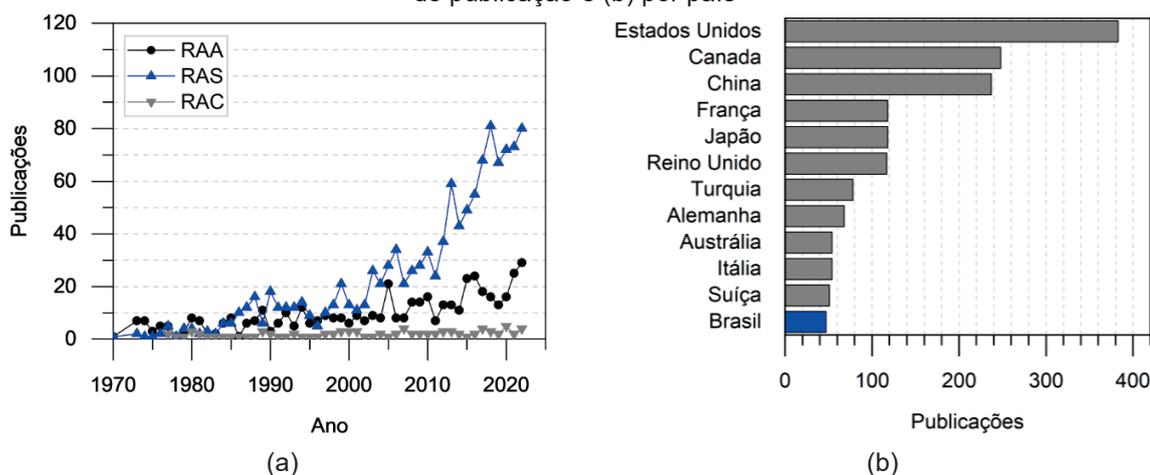
Evidências da ocorrência de RAA são caracterizadas por: fissuração em forma de mapa (em concretos sem armadura), fissuração orientada (em concreto armado), exsudação de gel na superfície do concreto, manchas superficiais, microfissuras com descoloração nas bordas, deslocamentos com descolamento entre pasta e agregado (perda de aderência) e expansão visível do concreto (HASPARYK, 2022a).

A reação álcali-agregado (RAA) pode ser dividida em dois tipos: reação álcali-sílica (RAS) e reação álcali-carbonato (RAC). No Brasil, segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a), a reação álcali-sílica costuma ocorrer em rochas ou minerais silicosos e produz o gel álcali-sílica, que pode causar expansão anormal e fissuração do concreto em serviço. Já a reação álcali-carbonato, reconhecida atualmente como um tipo lento da reação álcali-agregado, envolve a desdolitização de calcários dolomíticos argilosos com formação de brucita ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) sem presença de gel, que, sob certas condições, pode causar expansão (BATTAGIN et al., 2016). Dada a especificidade da reação álcali-carbonato, além de sua baixa ocorrência, essa reação

não é tratada pela ABNT NBR 15577 (ABNT, 2018a). Não existem registros conhecidos de RAC no Brasil (NETO; QUITETE; BATTAGIN, 2018), e sabe-se que pozolanas não se mostram eficientes na mitigação desta reação e, por este motivo, os agregados devem ser substituídos em casos positivos de RAC (HASPARYK, 2022a).

A reação álcali-agregado, por sua vez, foi identificada nos anos 30 na América do Norte e pesquisas relacionadas ao tema passaram a ser realizadas de forma mais aprofundada nos anos 40, após o fim da segunda guerra mundial (MEHTA; MONTEIRO, 2013; SIMS; POOLE, 2017). O primeiro congresso internacional sobre reação álcali-agregado (*International Conference on Alkali-Aggregate Reaction - ICAAR*) foi realizado em Copenhague em 1974, e o evento teve sua 15^o versão realizada no Brasil no ano de 2016. A Figura 1.3 apresenta o número de publicações realizadas sobre o tema ao longo dos anos.

Figura 1.3 - Publicações de artigos em periódicos na base Scopus¹ sobre a reação álcali-agregado (a) por ano de publicação e (b) por país



Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 1.3, é possível observar que o número de pesquisas sobre o tema é crescente e que o termo reação álcali-silica (RAS) é o mais utilizado nas publicações. Por este motivo, e por esta pesquisa focar na reação de agregados silicosos, doravante a reação álcali-agregado será tratada nesta pesquisa como reação álcali-silica (RAS). Observa-se ainda que países como Estados Unidos, Canadá e China são os principais a realizarem pesquisas sobre o tema (FRARE et al., 2022), enquanto o Brasil ocupa o 12^o lugar em número de publicações.

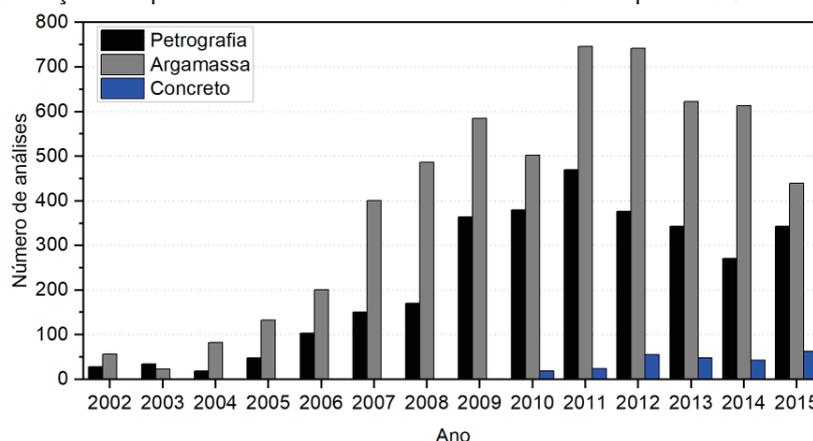
¹ Busca realizada com termos em inglês por extenso no título e palavras-chave das publicações existentes na base Scopus entre 1970 e 2022.

1.1.1 Panorama da RAS no Brasil

No Brasil, a adoção de medidas sistemáticas de prevenção à RAS já ocorreu na construção das barragens de Jupirá (1963), Água Vermelha (1979), Salto Osório (1975), Tucuruí (1984), Itaipu (1982), dentre outras - onde foram utilizados materiais pozolânicos para inibir a expansão devido ao uso de agregados locais reativos. A partir de 1985, o meio técnico brasileiro tomou conhecimento da ocorrência desse fenômeno nas barragens de Moxotó e Joanes II, ambas localizadas na Região Nordeste. Já em 2004 foi feita a constatação da RAS em diversas obras de edifícios de Recife e Fortaleza (PAULON, 2016). Recentemente, Hasparyk (2022) compilou casos de construções diagnosticadas com RAS, relatando casos a partir de 1964, sendo 35 deles em obras hidráulicas e outros 8 em obras variadas no Brasil.

Na Figura 1.4 são apresentados dados publicados por Battagin et al. (2016) referentes à análise de agregados realizadas pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) no Brasil até aquele ano. Não foi possível encontrar dados consolidados mais recentes sobre o tema. Os autores destacam um aumento expressivo no número de análises a partir de 2004 devido ao colapso do Edifício Areia Branca em Pernambuco. Apesar da RAS não ter sido o motivo do desabamento do edifício, a reação foi detectada nos blocos de fundação e trouxe à tona a discussão da importância da investigação da reatividade dos agregados (SILVA et al., 2021).

Figura 1.4 - Evolução da quantidade de ensaios de RAS realizados pela ABCP até 2016 no Brasil



Fonte: Autoria própria, baseado em Battagin et al. (2016)

De acordo com os dados publicados por Battagin et al. (2016), das 1994 amostras analisadas pela associação, 42% dos agregados graúdos e 26% dos agregados miúdos

apresentaram resultados potencialmente reativos. O Rio Grande do Sul foi o estado com o maior número de casos positivos para reatividade de agregados – com 73% dos agregados analisados (ensaio acelerado em argamassa) apresentando potencial reativo.

Como pode ser observado na Figura 1.4, apenas após a publicação da primeira versão da norma brasileira - ABNT NBR 15577 em 2008 - foi que se deu início à análise de RAS por meio de ensaios de longa duração em prismas de concreto. Porém, a análise da reatividade em concreto ainda é incipiente devido ao alto custo e tempo (1 ano) para obtenção de resultados conclusivos. De acordo com um levantamento realizado por Langaro (2023), o ensaio acelerado em argamassa segue sendo o método de ensaio mais utilizado em publicações sobre o tema.

Vale destacar que na época do estudo conduzido por Battagin et al. (2016) ainda não existia uma classificação para o grau de expansão dos agregados, sendo classificados como reativo qualquer agregado que produzisse expansão em argamassa acima de 0,19%. Pela nova classificação da NBR15577-1 (ABNT, 2018a), 10% dos agregados graúdos avaliados pelos autores poderiam ser classificados com grau 3 (R3) e exigiriam forte ação preventiva, uma vez que apresentaram expansões superiores à 0,6%.

No Paraná, os trabalhos de Miranda et al. (2019) e Portella et al. (2021) investigaram a reatividade de 8 areias naturais e constataram que 73% delas necessitariam de ações de mitigação² para a produção de concreto. Nesta mesma linha, a pesquisa de Tiecher (2010) constatou reatividade em 100% dos 40 agregados avaliados no estado do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Valduga (2002) identificou que 60% dos 36 agregados avaliados no estado de São Paulo apresentaram potencialidade reativa. Destaca-se que todos os estudos foram realizados utilizando o método acelerado em barras de argamassa, em agregados já suspeitos de reatividade.

Adicionalmente, estima-se que 60% das obras executadas no Brasil não realizam testes de laboratório para detectar e prevenir a RAS, e cresce o número de estruturas jovens - com idade entre 5 anos e 10 anos - que possuem diagnóstico para este tipo de degradação. O desconhecimento do mecanismo de degradação denominado RAS por cerca de 60% dos profissionais de engenharia civil e o custo de cerca de 6 mil reais (em 2019) para a realização de uma bateria de ensaios para RAA são os principais fatores para esse cenário no Brasil (SANTOS, 2019).

² O termo mitigação, segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a), é definido como “abrandamento, redução ou atenuação dos efeitos da reação álcali-agregado”.

Não se tem notícias de casos brasileiros onde os efeitos da reação tenham levado ao colapso de estruturas, mas sim à necessidade de manutenção corretiva que, em qualquer situação, é mais onerosa do que a prevenção do fenômeno (NETO; QUITETE; BATTAGIN, 2018), sendo normalmente paliativas e caras.

1.2 PROBLEMAS DA PESQUISA

Ainda que diversos estudos tenham sido realizados nas últimas décadas, a RAS ainda não é inteiramente compreendida e muitas são as lacunas que necessitam de investigações mais aprofundadas (NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018; RAJABIPOUR et al., 2015a).

A RAS costuma ocorrer de forma lenta, o que exige o acompanhamento da expansão de prismas em laboratório durante anos, e requer que obras de infraestrutura sejam monitoradas continuamente para a detecção de deformações em sua estrutura. Em barragens, por exemplo, o monitoramento de deslocamento de elementos estruturais costuma ser realizado por meio de sensores eletrônicos ou levantamentos topográficos (MOSER, 2006).

Contudo, a maioria dos sensores disponíveis no mercado não possuem durabilidade adequada frente à ambientes agressivos aos quais as estruturas muitas vezes se encontram submetidas (ambientes marítimos ou industriais), e às temperaturas utilizadas para acelerar as reações em laboratório - de 38°C a 80°C (DU et al., 2019). Por este motivo, as leituras periódicas costumam ser realizadas de forma manual utilizando hastes metálicas e pinos embutidos nas amostras, e os sistemas de monitoramento eletrônico podem sofrer degradações em conjunto com a estrutura.

A análise petrográfica é um dos métodos disponíveis para análise do potencial reativo de rochas, contudo, o ensaio não é capaz de classificar um mineral como reativo sem testes complementares de expansão (RILEM, 2013; SANCHEZ et al., 2017a). Isso porque a reatividade do agregado depende não apenas do tipo de mineral em sua composição, mas também do tamanho e distribuição desses minerais no grão, seu grau de amorfismo e ligações químicas (BLIGHT; ALEXANDER, 2011; RAJABIPOUR et al., 2015a; RILEM, 2013; SWAMY, 1992). Além da análise petrográfica, não existem métodos confiáveis para a avaliação do agregado de forma dissociada do concreto, em que ocorram interferências do tipo de cimento utilizado, sua composição química, métodos de moldagem, cura e instrumento de medição. Essas características variam em cada laboratório e país, influenciando as leituras realizadas.

Por este motivo, alguns estudos utilizam vidro borossilicato visando simular um agregado reativo padronizado em estudos que investigam a cinética da RAS (MAIA NETO et al., 2021).

A RAS nem sempre ocorre na interface agregado-pasta de cimento (zona de transição), podendo também iniciar no interior de alguns agregados (SIMS; POOLE, 2017). O mecanismo de expansão interna do agregado ainda não é inteiramente conhecido pois sua instrumentação é complexa. Portanto, é difícil estimar a geração de tensões internas no concreto provenientes da expansão dos grãos de agregados e determinar com exatidão o local de origem da reação. Estas tensões são ainda transferidas para a armadura e geram deformações não previstas nas estruturas de concreto.

Os métodos para avaliação da expansão de amostras de concreto em laboratório se baseiam na leitura da variação dimensional de corpos de prova utilizando micrômetros ou relógios comparadores, e dependem do correto manuseio dos equipamentos e de operadores treinados para realizar o posicionamento dos mesmos nas amostras (RILEM, 2013; RIVARD; FOURNIER; BALLIVY, 2002). Para a realização de ensaios acelerados para a classificação da reatividade de agregados, se faz necessária a retirada periódica das amostras do ambiente de cura térmica/acelerada para a realização das leituras, e o resfriamento incorreto da amostra pode afetar diretamente as leituras de expansão. Portanto, as medições de expansão em prismas de concreto é um procedimento delicado, dada a alta precisão necessária (na faixa de micrômetros) e realização de leituras manuais.

A criação de ambientes de envelhecimento natural para comparação com ensaios acelerados realizados em laboratório é de extrema importância (HASPARYK, 2022a). Os ensaios normatizados para avaliação da reação preveem o monitoramento da reação apenas em amostras de laboratório, que muitas vezes se encontram em condições diferentes da estrutura (SIMS; POOLE, 2017). Por este motivo, além de medidas de expansão em amostras de concreto, diversas técnicas complementares têm sido desenvolvidas para o diagnóstico da RAS como emissão acústica, ultrassom, espectroscopia, identificação e microscopia (ABDELRAHMAN et al., 2015; BLIGHT; ALEXANDER, 2011; CHEN et al., 2010; DAHLEN; RYDEN; JAKOBSSON, 2015; FARNAM et al., 2015; ISLAM; GHAFUORI, 2018; SANCHEZ et al., 2017a). Contudo, parte das metodologias propostas não podem ser aplicadas em estruturas reais ou de grande porte devido às dimensões e capacidade dos equipamentos, ou à alta sensibilidade que impede seu transporte ao campo.

Desta forma, a medida da expansão de peças de concreto ainda é a forma mais confiável para a avaliação da RAS, e existe então a necessidade de métodos não destrutivos

de avaliação estrutural e monitoramento da degradação da RAS (ABDELRAHMAN et al., 2015). Ainda que técnicas de avaliação possam ser realizadas na estrutura existente, não é possível saber como o parâmetro avaliado era originalmente na estrutura recém-construída, o que limita a aplicação de alguns modelos de prognóstico.

Sensores em fibras óticas com redes de Bragg (FBG ou *Fiber Bragg Grating*) aplicados na área de monitoramento estrutural poderiam permitir a avaliação de expansões internas provenientes de reações expansivas como a RAS em campo ou laboratório. Contudo, as aplicações destes sensores na construção ainda são limitadas a medidas externas de temperatura e deformações de elementos íntegros (DU et al., 2019; GLISIC; INAUDI, 2007).

Ainda que existam relatos de obras instrumentadas com fibra ótica com FBGs (KO; NI, 2005), não existem informações disponíveis acerca da durabilidade do sensor no concreto. É ainda necessária a verificação da precisão destes sensores frente aos sensores eletrônicos já disponíveis no mercado e comparação com métodos tradicionais de monitoramento, bem como estabelecer sua correta calibração, fixação e proteção.

Devido ao seu diâmetro reduzido e baixa capacidade de curvatura, as fibras óticas são frágeis e estão sujeitas a quebra, especialmente durante sua instalação nas estruturas, e por esse motivo necessitam de proteção de superfície. Outras questões práticas da utilização de FBGs em estruturas civis são a sensibilidade cruzada de deformação e temperatura, os problemas de entrada e saída do cabeamento e a correta fixação do sensor e dos cabos (LI; LI; SONG, 2004). Durante a vida útil de uma estrutura, vários tipos de defeitos são gerados nela. Para ser uma ferramenta útil no monitoramento estrutural, é necessário analisar cuidadosamente a resposta do sensor FBG a esses diferentes tipos de defeitos (MAJUMDER et al., 2008).

Isto posto, são diversas as lacunas de conhecimento acerca da RAS e seus mecanismos de ação, bem como do uso de FBGs no monitoramento estrutural, sua correta aplicação e durabilidade. Portanto, esta tese visa contribuir com o estudo da reação álcali-sílica aplicando sensores em fibra ótica com rede de Bragg para sua avaliação.

1.3 OBJETIVO

O objetivo geral desta tese é desenvolver meios de **aplicação de sensores em fibra ótica com rede de Bragg (FBG) para a avaliação da reação álcali-sílica**. A fim de alcançar

o objetivo geral, são propostos objetivos específicos para cada tema abordado. Na Tabela 1.1 são mostrados os objetivos para cada capítulo experimental desta tese.

Tabela 1.1 - Objetivos específicos da tese

Tema	Objetivos específicos
Fabricação, calibração e validação do sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Determinar o melhor tipo de fibra para produzir sensores FBG; • Comparar leituras realizadas por FBG com sensores eletrônicos disponíveis no mercado; • Realizar medidas estáticas da deformação específica e cálculo do módulo estático em vigas de argamassa; • Realizar medidas dinâmicas da frequência de vibração, coeficiente de amortecimento e cálculo do módulo dinâmico em vigas de argamassa.
Aplicação do sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterizar um agregado reativo; • Realizar a medida de expansão normatizada (por pinos) em concretos afetado por RAS; • Realizar a medida de expansões por sensor ótico (FBG) em concretos afetado por RAS; • Comparar resultados obtidos por ensaios normatizados, FBG e técnicas de diagnóstico.
Durabilidade do sensor	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar a durabilidade da FBG em solução; • Analisar a durabilidade dos sensores embutidos em concreto; • Propor melhorias no processo de encapsulamento do sensor.

Fonte: Autoria própria

1.4 JUSTIFICATIVA

1.4.1 Social

Entre 2000 e 2020, de acordo com o *Emergency Events Database* (CRED, 2020), 11% dos desastres do mundo ocorreram devido à fatores humanos (não naturais), e cerca de 9 mil pessoas morreram neste período devido ao colapso de estruturas. Além disso, o colapso total de monumentos históricos, como pontes de pedra e catedrais antigas, representa uma perda cultural irremediável para a sociedade (GLISIC; INAUDI, 2007).

Além das mortes contabilizadas, acidentes estruturais podem deixar pessoas desabrigadas, desaparecidas, feridas e causar danos irreversíveis na infraestrutura das cidades. Devido ao rompimento da barragem de rejeito de Brumadinho, em Minas Gerais, que deixou 270 mortos e 3 desaparecidos; o Brasil encontra-se em quarto lugar na lista de países com maior número de mortes causadas por colapso estrutural no mundo nas últimas duas décadas, ficando atrás apenas de Bangladesh, Índia e China (CRED, 2020).

Após o acidente de Brumadinho em 2019 foi promulgada a Lei nº 14.066/2020 que aumentou exigências para segurança de barragens de rejeitos, de enrocamento e de concreto; alterando a Lei nº 12.334/2010 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens,

a Lei nº 7.797/1989 que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente, a Lei nº 9.433/1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227/1967 que trata do Código de Mineração.

De acordo com o Relatório de segurança de barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) publicado em 2021, após alteração da legislação, existem 22.654 barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Do total de barragens cadastradas, 57% não possuem informações suficientes para classificação quanto à Categoria de Risco (CRI) e Dano Potencial Associado (DPA). Das barragens classificadas e que possuem informações suficientes para sua classificação, 1.219 possuem simultaneamente um alto risco e alto potencial de dano (ANA, 2021). Apenas durante o ano de 2021 foram relatados 13 acidentes e 37 incidentes em 16 estados, sobretudo na região central do país.

Tendo em vista o relatório publicado pela ANA em 2021, a Agência Nacional De Mineração publicou no ano seguinte a Resolução ANM Nº 95/2022 passando a exigir (no Art. 7º, § 1º) que em barragens de mineração classificadas com DPA alto, o empreendedor é obrigado a manter sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral. Reforçando, portanto, a necessidade de investimentos em instrumentação por sensores para estruturas em estado crítico. Neste sentido, o monitoramento em tempo real de estruturas é essencial para impedir acidentes e cumprir a legislação vigente do país.

1.4.2 Ambiental

A indústria do cimento é a terceira com maior consumo de energia e responde por 7% do total mundial de emissão de CO₂ (MATOS; SAKATA; PRUDÊNCIO, 2019). O *Intergovernmental Panel on Climate Change* estimou que, para evitar danos irreversíveis ao clima do planeta, ao menos 50% das emissões de gases de efeito estufa deve ser reduzidas até 2050 (ALLWOOD et al., 2013). Todavia, não há tendência de diminuição da fabricação de cimento no mundo (IEA, 2022): em 2022 foram produzidas 80 mil toneladas a mais de cimento, em comparação com 2021, e há perspectivas de aumento da produção de cimento de 12 a 23% até 2050 (U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2020). Além disso, considera-se que ainda não exista substituto para o concreto em grandes obras (LIFSET; ECKELMAN, 2013).

Neste sentido, é necessário investir na manutenção e reparo de obras existentes, evitando sua demolição e reconstrução; possibilitando atenuar o impacto ambiental gerado pelo setor, reduzindo a exploração de matérias-primas naturais e o impacto do descarte dos resíduos gerados. Sendo a prevenção a forma mais eficiente e econômica de se enfrentar o desafio de realizar obras duráveis (NETO; QUITETE; BATTAGIN, 2018).

Ainda que a reciclagem de materiais de construção venha se consolidando como uma ferramenta essencial para a sustentabilidade (ÂNGULO; ZORDAN; JOHN, 2001; JOHN; AGOPYAN, 2000; MIRANDA; ANGULO; CARELI, 2009), os efeitos do uso de agregados reciclados provenientes de concretos que possuam agregados reativos não são inteiramente conhecidos, uma vez que o processo de britagem deste concreto pode expor parte dos minerais que ainda não haviam reagido e intensificar seu efeito deletério (BARRETO SANTOS; DE BRITO; SANTOS SILVA, 2020). Assim, ainda que técnicas de mitigação possam ser utilizadas, muitas obras evitam o uso destes agregados, que se tornam um passivo ambiental. Compreender como agregados reativos se comportam permitiria a contratação de fornecedores locais que dispõem destes agregados, contribuindo para o desenvolvimento e geração de renda local. Estudos preliminares indicam que o uso de agregados reciclados provenientes de estruturas de concreto afetadas por RAS ainda possuem o mesmo potencial de expansão do que concretos contendo agregados reativos, pois o processo de britagem e fissuras iniciais tendem a facilitar a indução da reação (TROTIER, 2020).

Além disso, o colapso de certas estruturas, tais como usinas nucleares ou oleodutos, pode provocar grave poluição do meio ambiente (GLISIC; INAUDI, 2007). A usina nuclear de Seabrook (EUA), por exemplo, já foi diagnosticada com RAS, bem como a usina Gentilly-2 em Quebec (Canadá) (HASPARYK, 2022a). Portanto, garantir a integridade estrutural de obras existentes com RAS é essencial para a preservação do meio ambiente.

1.4.3 Econômica

Devido à falta de investimento em conservação e manutenção de obras de infraestrutura, elas costumam apresentar elevado grau de deterioração. Esta realidade é corroborada pela pesquisa do Fórum Econômico Mundial, na qual o Brasil, entre 138 países, ocupou a 116ª posição em qualidade de infraestrutura viária em 2018 (OECD, 2018).

De acordo com o Plano Integrado de Longo Prazo da Infraestrutura (2021-2050) do Comitê Interministerial de Planejamento da Infraestrutura, considerando o Plano Nacional de

Logística, apenas para a manutenção da infraestrutura de transportes (rodovias, pontes e viadutos) será necessário um investimento de 362 bilhões de reais até 2035. Para a área de Saneamento e de Infraestrutura Hídrica, o documento estima uma necessidade de investimento de 27 bilhões de reais até 2035 (ampliação, operação e manutenção do sistema existente).

No que diz respeito ao investimento em segurança de barragens no Brasil, o relatório da ANA em 2021 aponta que os valores orçamentários previstos em segurança de barragens foram os maiores da série histórica, um montante aproximado de R\$ 199 milhões, sendo 34% da esfera federal e 66% da esfera estadual. Contudo, o relatório afirma que os recursos orçamentários públicos recebidos ainda são inferiores ao necessário para uma adequada manutenção preventiva e atendimento aos requisitos legais sobre segurança das barragens.

Para observar as mudanças nas estruturas e para reagir de forma adequada antes que problemas aconteçam, a implementação de um sistema de identificação de danos é fundamental. O monitoramento do comportamento estrutural pode detectar anomalias a tempo, permitindo a implementação de ações mais eficientes de manutenção e reparo. Desta forma, o monitoramento contínuo tem impacto direto na redução dos custos operacionais, não sendo necessária a realização de inspeções e ensaios periódicos (KO; NI, 2005; MOBLEY, 2002). Ainda que a instrumentação estrutural envolva um considerável investimento, o custo de reconstrução e gastos para minimizar o impacto do colapso de uma estrutura de grande porte será sempre superior ao investimento realizado em um sistema de monitoramento.

A tecnologia que mais tem ganhado espaço no mercado são os sensores óticos devido à sua ampla gama de aplicações (DU et al., 2019; RAJAN; PRUSTY, 2016). O mercado mundial de sensores óticos atingiu o patamar de 21,8 bilhões de dólares em 2022, e espera-se uma taxa de crescimento de 10% até 2028 (IMARC, 2022).

1.4.4 Técnica

Na última década, progressos significativos foram feitos na tecnologia de sensores, com o desenvolvimento e aplicação de novos produtos. Dentre eles, pode-se citar os nanossensores - cujos elementos ativos incluem nanotubos e filmes finos que apresentam propriedades físico-químicas particulares devido ao movimento das cargas elétricas (CAI et al., 2010); e os biosensores, que realizam medidas rápidas *in loco* de componentes químicos

e biológicos a partir de bioreceptores como antígenos, enzimas, ácidos nucleicos e estruturas celulares (GRATTAN; MEGGITT, 2000).

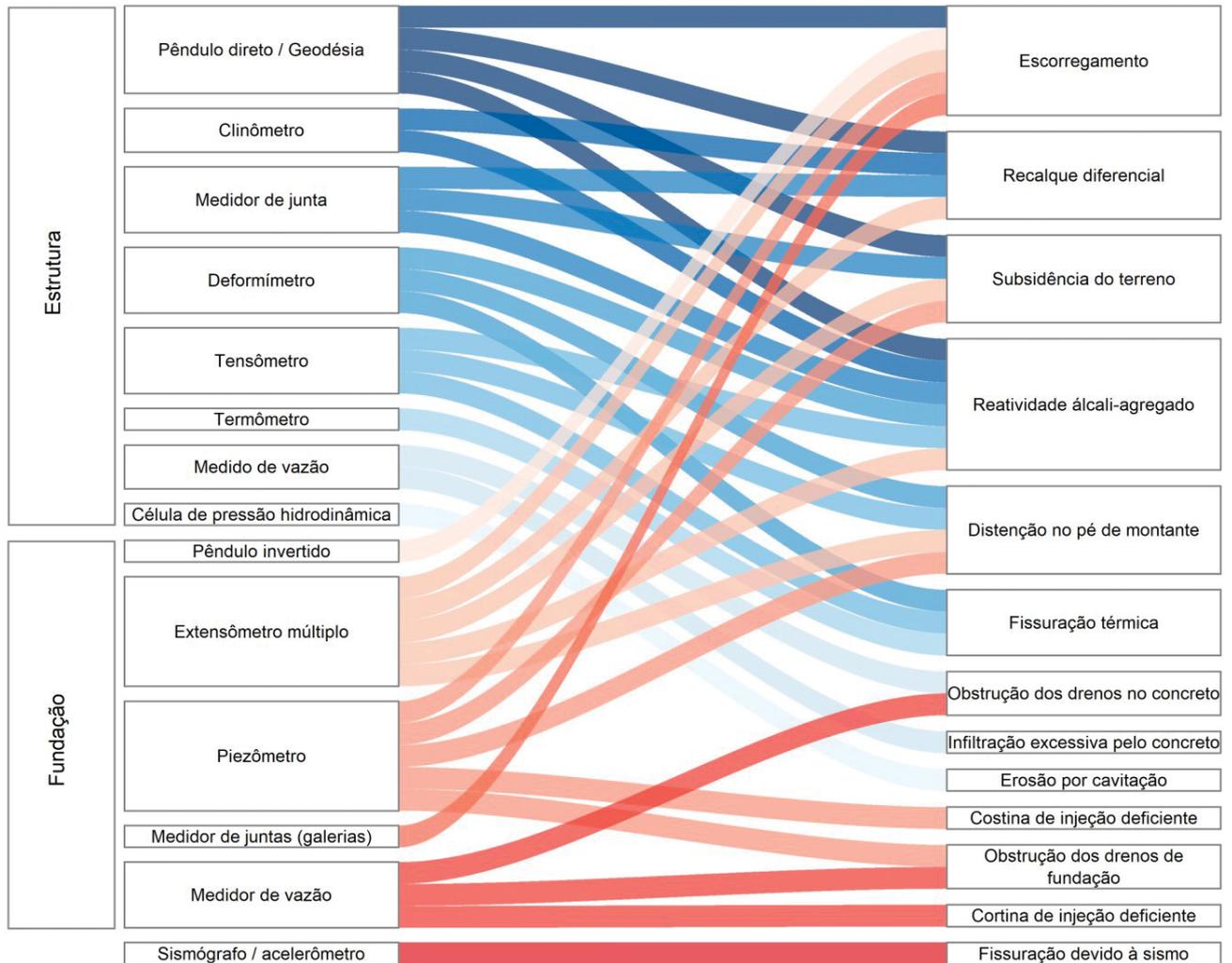
No monitoramento estrutural, a aplicação de sensores sem fio vem ganhando espaço por permitir a aquisição de sinais em locais de difícil acesso e por permitirem integração com dispositivos móveis. Nanossensores, biosensores, sensores sem fio e sensores baseados em fibras óticas, apesar de não serem ainda largamente utilizados para monitoramento estrutural, apresentam diversas vantagens sobre os sensores eletrônicos.

Na Figura 1.5 é possível observar a correlação entre tipos de anormalidades em barragens de concreto e os instrumentos de observação utilizados para sua detecção. Silveira (2006) afirma que o instrumento atualmente mais apropriado para o monitoramento da expansão por RAS em barragens são extensômetros múltiplos de haste, enquanto Zoilo (2010) explica que o uso de medidores LASER e LVDT instalados em barragens apresentam funcionamento satisfatório no monitoramento da RAS. Saouma (2021) afirma que para monitorar RAS em estruturas de concreto são mais utilizados pêndulos, transdutores de deslocamento mecânicos/indutivos (LVDT) e scanner lasers, mas que extensômetros e inclinômetros também podem ser utilizados. O autor ainda destaca que a maior parte dos sistemas de monitoramento das estruturas não são planejadas para acompanhamento da RAS.

Neste sentido, a utilização de sensores FBG permite a medida de múltiplos pontos utilizando diferentes FBGs gravadas em uma mesma fibra e um mesmo canal de aquisição, o que acarreta redução do custo dos sistemas de monitoramento com elevado número de sensores (CHESTER; MARTELLUCCI; SCHEGGI, 1987; KHADOUR; WAEYTENS, 2018).

Os sensores eletrônicos disponíveis no mercado como extensômetros, acelerômetros e transdutores de deslocamento, apesar de possuírem um custo de aquisição atrativo, tornam-se muitas vezes inviáveis quando precisam ser utilizados em grande quantidade por dependerem de um sistema de aquisição oneroso e complexo. Outro aspecto a ser considerado é o fato de que sensores eletrônicos são pouco duráveis frente à agentes agressivos e necessitam de constante substituição quando aplicados em zonas industriais e marítimas - característica presente em grande parte das obras de infraestrutura (ALAMPALLI; MOREAU, 2016; MAJUMDER et al., 2008). Sensores eletrônicos possuem componentes metálicos que sofrem com oxidação e alteração de suas partes, tendo durabilidade entre 3 e 5 anos (ALAMPALLI; MOREAU, 2016). Já os sensores de fibra ótica apresentam durabilidade superior por não sofrer oxidação (VULLIEX, 2013).

Figura 1.5 - Sistemas de instrumentação e tipos de deterioração



Fonte: Adaptado de Silveira (2003)

Por serem eletricamente passivos, os sensores óticos não sofrem interferências eletromagnéticas e podem ser utilizados próximos a estações elétricas e em locais com incidência de descargas elétricas atmosféricas - comuns em barragens e pontes, por exemplo (DAUD; ALI, 2018; FAJKUS et al., 2018; GRATTAN; MEGGITT, 1999).

Ambientes com materiais inflamáveis também se beneficiam do uso de sensores óticos que, por não necessitarem de corrente elétrica, reduzem o risco de explosões. Além disso, não necessitam de alimentação de corrente elétrica diretamente no sensor, o que pode ser um problema na aplicação de sensores eletrônicos em obras afastadas de centros urbanos, em que não exista alimentação elétrica (KHADOUR; WAEYTENS, 2018; KUHNE, 2016; SILVA, 2005).

Outra vantagem da fibra ótica é a baixa atenuação em longas distâncias, fato que necessita de atenção quando o método de monitoramento é aplicado em estruturas com grandes vãos ou com elementos distantes do equipamento de aquisição de sinais. No caso dos sensores eletrônicos, pode ser necessário a implantação de repetidores de sinais e amplificadores para que os dados cheguem ao sistema de aquisição de forma íntegra, o que não é necessário com a FBG (DAUD; ALI, 2018; LEUNG, 2001).

A fibra ótica, devido as suas dimensões reduzidas, torna-se uma opção adequada para monitoramento de elementos aparentes ou construções com interesse histórico, uma vez que é leve e transparente, tornando-se quase imperceptível em locais com visitação pública (KHAN, 2010). Além disso, o grande número de inovações na área de telecomunicações nas últimas duas décadas reduziu significativamente os preços dos componentes óticos e aumentou a sua qualidade, o que os torna atrativos na área de sensoriamento e de caracterização de materiais (CAPELAS, 2020). Sensores em fibra ótica pontuais e distribuídos são promissores na avaliação de estruturas afetadas por RAS, mas precisam ser avaliados a longo prazo (SAOUMA, 2021).

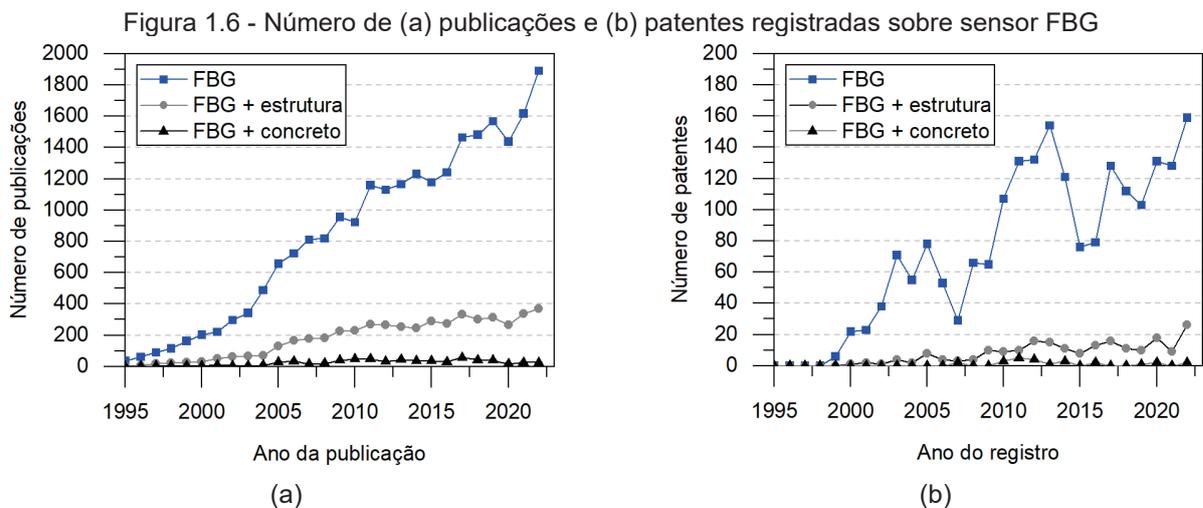
Portanto, o uso de FBG na construção civil poderá permitir um melhor investimento no monitoramento de obras, garantindo assim, a integridade da infraestrutura de barragens, pontes, viadutos, túneis e de edificações de grande porte. Além de permitir verificar a eficiência de reparos em elementos estruturais. Hasparyk (2022b) destaca a necessidade de monitoramento também de estruturas que receberam tratamentos superficiais para mitigação da RAS, por exemplo, a fim de avaliar o desempenho das técnicas utilizadas na manutenção corretiva de estruturas.

1.5 CARÁTER INOVADOR DA TESE

Como mencionado anteriormente, sensores em fibra ótica apresentam uma série de vantagens quando comparados à sistemas eletrônicos. Ainda assim, a maior parte da aplicação de sensores em fibra ótica limita-se a realizar medições de temperatura e deformação específica.

A FBG é extremamente versátil e permite a leitura e caracterização de diferentes propriedades em um único sensor, se corretamente aplicada. Para isso, deve existir uma metodologia de produção e calibração destes sensores, garantindo faixa de leitura e frequência

de aquisição adequadas, alta sensibilidade e baixo ruído. Estudos ainda estão sendo conduzidos de forma a compreender e otimizar a aplicação destes sensores na área da engenharia civil. Na Figura 1.6 é apresentado o número de artigos em periódicos relacionados ao uso de FBGs nas bases de dados³ SciVerse *Scopus* (*Elsevier*), e o número de patentes registradas no banco de dados *Derwent Innovations Index* (*Web of Science/ Clarivate Analytics*).



Fonte: Autoria própria

É possível observar um aumento expressivo no número de publicações e patentes utilizando o sensor FBG. Ao se realizar buscas da aplicação desta tecnologia ao monitoramento de estruturas (civis ou não) é possível também observar uma tendência de aumento no número de pesquisas e registros de patentes relacionados ao tema. Contudo, a mesma tendência não é observada na instrumentação de estruturas de concreto. Esta aplicação exige o desenvolvimento de diferentes técnicas de fixação, proteção e interpretação dos dados, pois trata-se de material heterogêneo, frágil, exposto a intempéries, com diferentes superfícies e acabamentos, que varia suas temperatura e propriedades ao longo do tempo.

Possetti et al. (2012) destacam que a aplicação de sensores deve ser acompanhada da análise da incerteza de medidas. Segundo os autores, um sensor pode apresentar as seguintes características metrológicas: curva de resposta, curva de calibração, sensibilidade, resolução, repetibilidade, reprodutibilidade, conformidade, incerteza expandida e ausência de

³ Busca realizada com termos em inglês por extenso no título e palavras-chave existentes nas bases entre 1995 e 2022.

padrões combinados. Os autores ainda destacam que a incerteza das medidas utilizando FBGs sofre forte influência da resolução do equipamento utilizado (33,4% da incerteza total).

O desenvolvimento e aplicação de sensores óticos, ainda que não seja uma área de estudo recorrente para o grupo de pesquisa de Patologia e Recuperação de Estruturas da UFPR, já foi tema de alguns trabalhos desenvolvidos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da instituição. Utilizando sensores em fibra ótica, Buras (2013) verificou a movimentação de barragens de solo, Rocha (2011) monitorou a saturação de solos arenosos e Moser (2006) avaliou barragens de concreto com os sensores. Contudo, estes estudos utilizaram sensores distribuídos que possuem um princípio de funcionamento diferente da FBG. No repositório da instituição existem mais de 200 dissertações ou teses que abordam o tema da RAS, destacando a atuação da UFPR no estudo da reação.

Dois trabalhos desenvolvidos no Brasil (pelo instituto LACTEC) afirmam ter utilizado sensores óticos na avaliação da reação álcali-sílica no concreto. Kleina et al. (2017) moldaram 4 barras de concreto com agregado basáltico de reatividade potencial, embutiram sensores FBG encapsuladas (comprimento de ancoragem de 1 m) e mantiveram as amostras a 40 °C por 1 ano. Após este período, os autores observaram variações dimensionais de retração e expansão inferiores à 0,005%, não podendo classificar o agregado utilizado como reativo. Jarek et al. (2012), por sua vez, utilizaram sensores distribuído de temperatura e deformação em fibra ótica (DTSS, baseados no espalhamento Brillouin) para monitorar a deformação específica em tubos metálicos, com comprimentos variando de 75 a 150 cm, preenchidos com argamassa que foram aquecidos para simular efeitos expansivos no concreto. Conclui-se, portanto, que os trabalhos existentes não foram capazes de avaliar a RAS no concreto, pois o programa experimental dos trabalhos era reduzido, e não foram apresentados ensaios complementares para a confirmação da reação e eficácia dos sensores na avaliação da expansão. Dunant e Scrivener (2012) utilizaram sensores FBG na medida de deformações internas de concretos submetidos à carregamentos estáticos para verificar o efeito da fluência e confinamento do concreto nas expansões por RAS. Os autores não fornecem detalhes sobre o sensor utilizado e não realizam medidas de expansão por outro método para fins de comparação e validação do sensor.

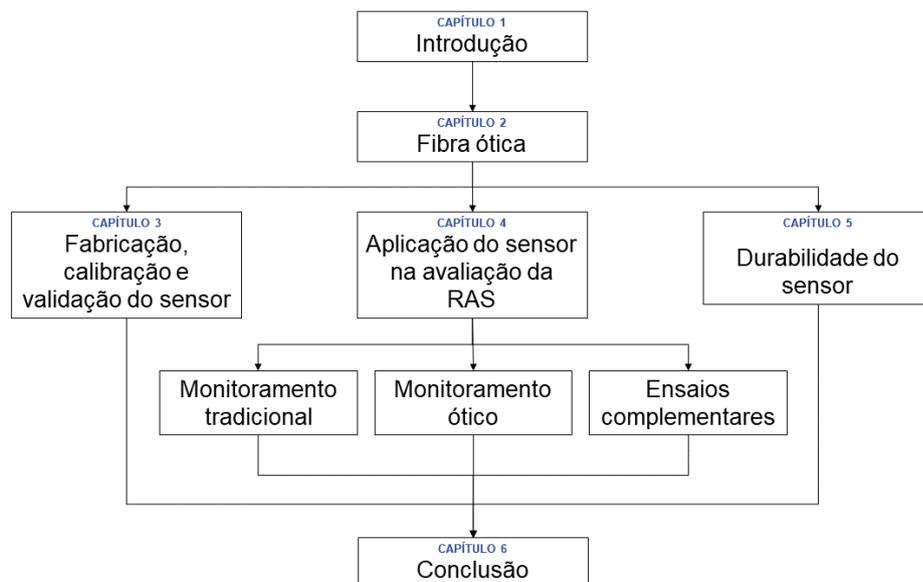
Por utilizarem sensores comerciais prontos, os trabalhos mencionados anteriormente também não fornecem informações acerca da fabricação, calibração e encapsulamento dos sensores, bem como da aquisição e processamento de dados. Ainda que pesquisas sobre sensores óticos como a FBG sejam crescentes, estudos na área de concreto utilizando esta

tecnologia ainda são insipientes. Pretende-se, portanto, colaborar com metodologias para o desenvolvimento e aplicação de sensores em fibra ótica e contribuir para a aplicação desta tecnologia no monitoramento de estruturas degradadas por RAS.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi estruturada em seis capítulos de forma a apresentar, inicialmente, a introdução e a revisão da literatura, seguida pela apresentação de três capítulos experimentais e uma conclusão (Figura 1.7). Cada capítulo experimental contém uma breve contextualização, objetivo específico, procedimento experimental, análise e discussões dos resultados e as considerações sobre os resultados obtidos.

Figura 1.7 - Fluxograma com as etapas da pesquisa



Fonte: Autoria própria

Assim, no capítulo 1 é feita a contextualização do tema, e são apresentados os problemas da pesquisa, os objetivos do trabalho, a justificativa, o caráter inovador e a estrutura da tese.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte acerca da produção de sensores óticos em fibra ótica com redes de Bragg. São descritos os princípios de funcionamento, gravação e aquisição de sinais óticos, além de sua aplicação na área de engenharia civil.

No capítulo 3, é realizada a fabricação, calibração e validação da FBG como sensor e avaliada sua capacidade de monitoramento de deformações. Para isso, sua leitura e precisão foi comparada com os demais sensores disponíveis no mercado por meio da avaliação de vigas de argamassa: deslocamentos, deformações específicas, coeficientes de amortecimento e frequências naturais de vibração determinados por diferentes metodologias, incluindo FBG. Os módulos estático e dinâmico do material também são estimados a partir das leituras realizadas.

No capítulo 4 é apresentada a revisão bibliográfica acerca dos mecanismos da RAS, da cinética da reação e métodos de diagnóstico da RAS. É realizada a caracterização de um agregado reativo e são realizados testes com fibras óticas para a detecção de deformações internas e externas provocadas pela reação álcali-agregado como método alternativo à medida de expansão de prismas de concreto.

No capítulo 5 os sensores FBG tem sua durabilidade avaliada pelo acompanhamento da intensidade do seu sinal ao longo do tempo após imerso em diferentes soluções agressivas. Também é discutido o efeito cavidade observado durante a instrumentação interna de amostras de concreto.

Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões acerca dos resultados mais relevantes obtidos, bem como sugestões para trabalhos futuros e publicações realizadas no período do doutorado.

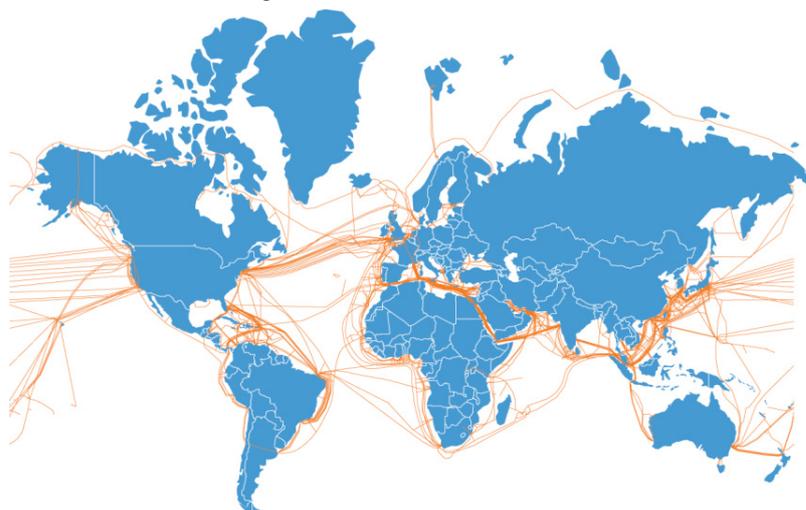
2 SENSOR EM FIBRA ÓTICA COM REDE DE BRAGG

2.1 FIBRA ÓTICA

A fibra ótica é um filamento flexível e transparente, fabricado a partir de vidro ou plástico extrudado. A fibra ótica tem diâmetro de dezenas a centenas de micrômetros, ligeiramente superior ao fio de cabelo humano, e costuma ser utilizada como condutor de luz, imagens ou pulsos codificados (MITSCHKE, 2016).

A principal aplicação da fibra ótica é como meio de transmissão de alta capacidade, baixa atenuação e interferência em sistemas de telecomunicação. Sua tecnologia de transporte de dados passou a ser explorada a partir da década de 70, com o desenvolvimento de lasers e detectores óticos (WILLNER, 2019). Ainda que seu uso em residências tenha se intensificado na última década; a rede estrutural (*backbone*) tem sido construída com cabos de fibra ótica (destacados na cor laranja na Figura 2.1) no Brasil desde 1992.

Figura 2.1 - Internet *backbone*



Fonte: Broadband Now (2020)

A fibra ótica é composta por duas partes principais: núcleo e casca, ambos tendo como base a sílica. O núcleo utiliza sílica levemente dopada com germânio, enquanto na casca utiliza-se sílica pura. Isto resulta em um maior índice de refração no núcleo, possibilitando, assim, o guiamento de ondas em seu interior (WILLNER, 2019). A casca reflete a luz difusa para o núcleo, através de reflexão interna total, garantindo que a transmissão tenha uma perda mínima (CHESTER; MARTELLUCCI; SCHEGGI, 1987). Isto faz com que a fibra funcione como

guia de onda, transmitindo luz entre as duas extremidades, como pode ser observado na Figura 2.2 - na qual θ_c é o ângulo crítico de incidência da luz no interior da fibra. Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais propriedades da sílica utilizada em fibras óticas.

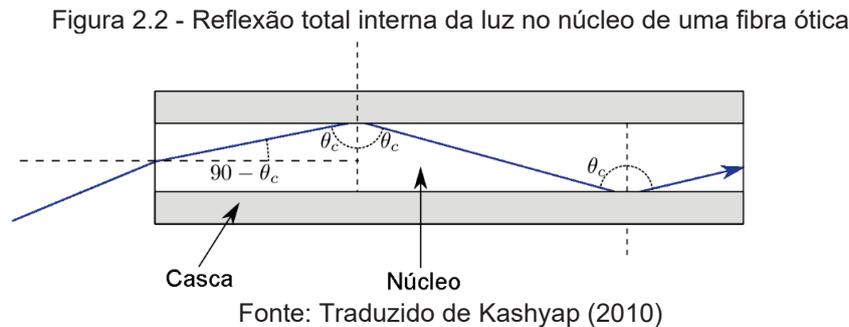


Tabela 2.1 - Propriedades da sílica utilizada em fibras óticas

Parâmetro	Valor
Densidade	2200 kg.m ⁻³
Índice de refração efetivo	1,447
Coefficiente de expansão térmica	5,5 x 10 ⁻⁷ °C ⁻¹
Condutividade térmica	1,38 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Resistência à tração	110 MPa
Resistência à compressão	690 a 1380 MPa
Coefficiente de Poisson	0,165
Módulo de elasticidade	73 GPa
Resistividade	1020 Ω.m
Carga de ruptura (Ø125µm)	245 N

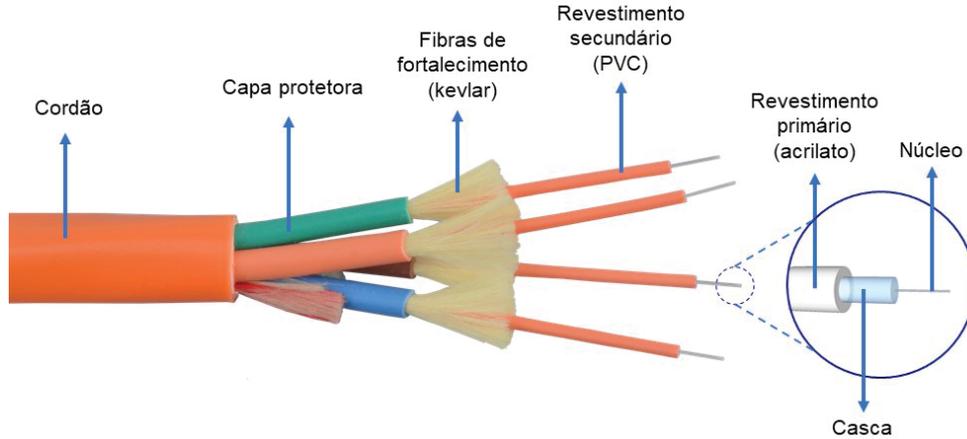
Fonte: Autoria própria, baseado em Grattan e Meggitt (1999), Kashyap (2010) e Mitschke (2016)

A fibra ótica é uma tecnologia associada a conexões de internet de alto desempenho, permitindo a transmissão de um volume de dados superior quando comparado a transmissões eletrônicas (GRATTAN; MEGGITT, 1998; MITSCHKE, 2016). Enquanto um cabo coaxial operando em uma frequência de 500 MHz apresenta perda de sinal na ordem de 100 dB/km, uma fibra ótica monomodo padrão de telecomunicação (padrão G-652 de acordo com a *International Telecommunications Union*) operando em um comprimento de onda 1550 nm apresenta atenuação de cerca de 0,2 dB/km (CARVALHO, 2010). Além de sua aplicação no setor de telecomunicações, outras tecnologias passaram a ser desenvolvidas com o uso deste material.

Ainda que o material da fibra ótica apresente resistência elevada quando comparada a outros materiais, sua fragilidade é alta devido ao seu diâmetro na ordem de 125 µm. Visando aumentar sua resistência, cabos de fibra ótica apresentam diversas camadas de proteção, que

servem para proteger a fibra das condições ambientais externas e de danos físicos. Estes componentes podem ser observados na Figura 2.3.

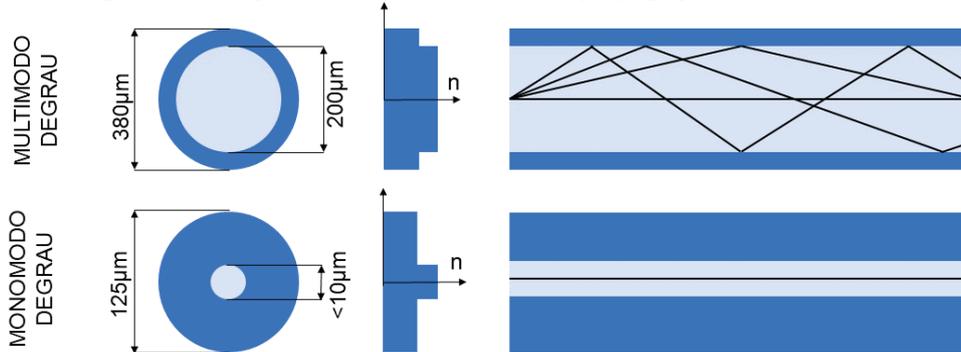
Figura 2.3 - Componentes da estrutura da seção transversal de um cordão de fibra ótica



Fonte: Autoria própria

Fibras óticas são divididas em dois grupos: monomodo e multimodo. As seções, o perfil do índice de refração (n) e os modos de propagação destas fibras podem ser observadas na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Seção transversal e modos de propagação em fibras óticas



Fonte: Autoria própria, baseado em Fidanboyly e Efendioğlu (2009)

As fibras monomodo possuem um diâmetro menor no núcleo, além de uma casca mais espessa. Os modos de propagação se referem às formas ou caminhos de transmissão da luz no interior da fibra ótica (OKAMOTO, 2006). A variação do índice de refração em fibras multimodo pode ser gradual ou degrau (FIDANBOYLU; EFENDIOĞLU, 2009), como apresentado na Figura 2.4.

2.2 SENSORES BASEADOS EM FIBRA ÓTICA

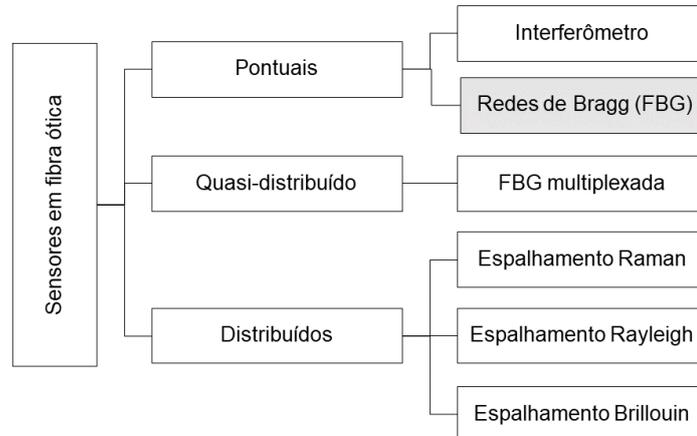
Diversas áreas se beneficiam com o uso de fibras óticas; na indústria, as fibras óticas são utilizadas principalmente em sistemas de telemetria (comunicação para comandar, medir ou rastrear processos). Na área médica há um vasto número de aplicações, possibilitando observar e iluminar o interior do corpo humano, além do uso em aparelhos de imagens, sensores de temperatura, pressão, pH e de vazão sanguínea. Na indústria automobilística, as aplicações das fibras vão desde o controle do motor e da transmissão até os acessórios secundários (controle de janelas, aquecimento e refrigeração) (CHESTER; MARTELLUCCI; SCHEGGI, 1987).

Fibras óticas podem também ser utilizadas como sensores no monitoramento de processos industriais e no desenvolvimento de novas metodologias de caracterização de materiais baseadas em técnicas da fotônica: campo da ciência dedicada a estudar a luz (PAIVA, 2015). Os sensores em fibra ótica operam através da modulação de uma ou mais características da radiação guiada (intensidade, comprimento de onda ou frequência, polarização e fase), cada uma das quais potencialmente sensíveis em determinadas grandezas físicas (BURAS, 2013). As medidas podem ser realizadas por meio de variadas técnicas que permitem a fabricação de diferentes sensores baseados em fibras óticas, como apresentado na Figura 2.5.

Assim, o termo “sensor em fibra ótica” engloba diferentes tipos de fibras, técnicas de medida e tipos de sensores que possuem faixas de leituras e precisão diferentes. Sensores em fibra ótica baseadas em rede de Bragg (FBG ou *Fiber Bragg Grating*), foco deste estudo, permitem leituras pontuais (não distribuídas) de temperatura e deformação específica, normalmente utilizando fibras monomodo (PETERS; INAUDI, 2014).

Assim, sensores pontuais como a FBG são indicados para a instrumentação de elementos estruturais de forma localizada como deformações geradas no meio de vãos ou próximas à apoios, vibrações, abertura de fissuras, distribuição de tensões, entre outros (MEC et al., 2018; RODRIGUES et al., 2010). No caso de instrumentação de elementos maciços como blocos de fundação, sensores pontuais fixados em pontos de ancoragem distantes podem ser mais indicados devido à sua representatividade em relação às dimensões do elemento estrutural.

Figura 2.5 - Tipos de sensores em fibra ótica



Fonte: Autoria própria, baseado em Glisic e Inaudi (2007) e Khadour e Waeytens (2018)

Estruturas com múltiplos pontos de instrumentação, como vãos de pontes, pode exigir a multiplexação de FBGs para leituras em diferentes regiões utilizando apenas um cabo de fibra ótica. Contudo, para a correta avaliação global de grandes estruturas como variações do maciço das barragens, flexões em torres eólicas, movimentação de terra ao longo de túneis, o uso de sensores distribuídos costumam ser a melhor opção (SU et al., 2013; WANG et al., 2010). Por este motivo, cada caso deve ser cuidadosamente avaliado para que a instrumentação aplicada possa representar de forma confiável o comportamento da estrutura e possua a capacidade de avaliar a grandeza que necessita ser investigada. Neste contexto, para a avaliação de expansões em agregados, armaduras e acompanhamento de abertura de fissuras devido à RAS, a utilização de sensores pontuais FBG seriam o melhor tipo de sensor a ser utilizado.

2.2.1 Redes de Bragg em fibra ótica (FBG)

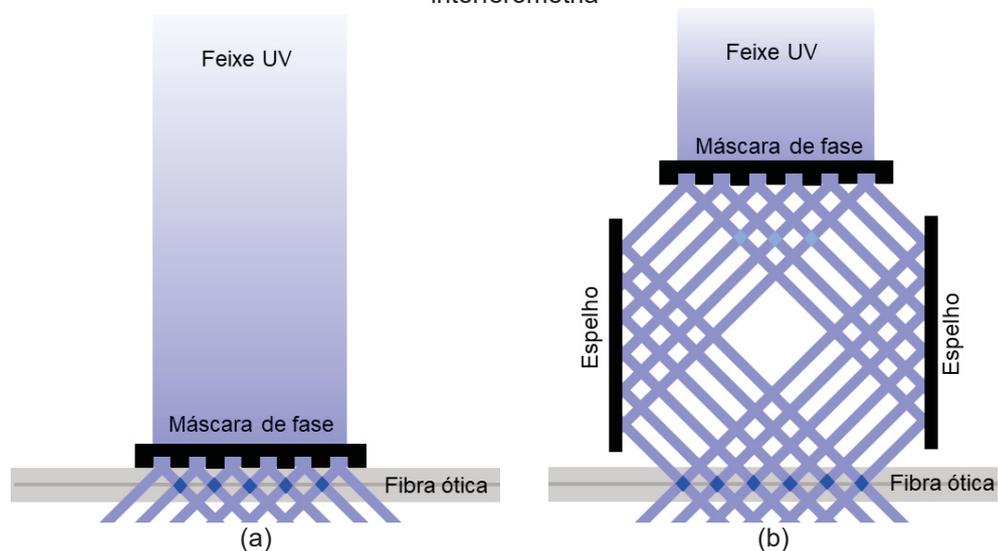
A fabricação da Redes de Bragg em fibra ótica (FBG) é baseada na alteração do índice de refração do núcleo da fibra de vidro em trechos específicos, de forma periódica, criando um filtro ótico na fibra utilizando o fenômeno da difração. Esta modificação é possível devido à fotossensibilidade da fibra ótica, que permite uma mudança estável do índice de refração no núcleo da fibra quando exposta à luz ultravioleta (UV) (SILVA, 2005). Apesar de não ser totalmente compreendido, este fenômeno ocorre devido à existência de defeitos relacionados à incorporação de átomos de germânio na estrutura vítrea das fibras óticas durante sua

fabricação que, quando expostos à radiação UV, quebram suas ligações e geram bandas de absorção de luz (KASHYAP, 2010).

Algumas técnicas permitem o aumento da fotossensibilidade das fibras, como o aumento da concentração de germânio em seu núcleo e a utilização de co-dopantes como boro durante sua fabricação. Outra técnica também utilizada é a hidrogenação, que consiste em expor a fibra a uma alta concentração de hidrogênio em uma câmara por um longo período (HILL et al., 1978; OTHONOS, 1998).

Portanto, o processo de gravação de redes de Bragg em fibras óticas (FBG) consiste na difração de um feixe colimado de luz UV com comprimento de onda fixo produzido por um LASER sobre a fibra, pois seu comprimento de onda fixo permite a interação entre os feixes difratados por uma rede de difração chamada de máscara de fase. O processo de difração e gravação de redes de Bragg em fibras óticas pode ser realizado por diferentes técnicas, sendo interferometria ou iluminação direta as mais comuns. Esses processos podem ser observados na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Métodos de gravação de FBG utilizando máscara de fase por (a) iluminação direta e (b) interferometria



Fonte: Autoria própria, baseado em Kashyap (2010)

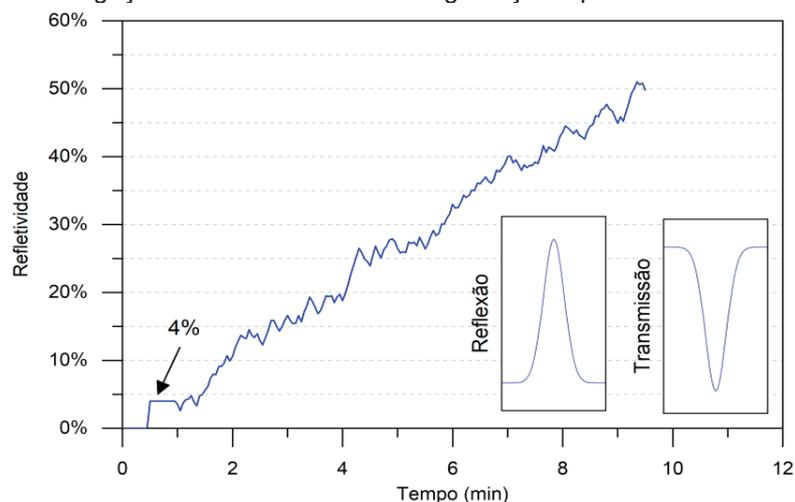
Em ambos os processos, a difração do feixe é obtida com o uso de uma máscara de fase, que consiste em uma série de depressões longitudinais na superfície de um substrato de sílica produzidas por fotolitografia (SILVA, 2005).

O método direto consiste na produção de redes de Bragg na fibra ótica pela incidência de apenas um feixe perpendicular na máscara de fase que está posicionada próxima à fibra,

criando a modulação no índice de refração e, por consequência, um sensor ótico. Durante o processo de gravação, a fibra ótica irá desenvolver a capacidade de refletir um comprimento de onda específico em função do espaçamento periódico da grade criada no seu núcleo.

No processo interferométrico, um feixe UV que parte do LASER é difratado após atingir uma máscara de fase. Os feixes difratados então são refletidos com o auxílio de espelhos simétricos e interferem entre si. Nos pontos de interferência é posicionado o núcleo da fibra ótica, que sofre alterações em seu índice de refração nestes pontos ao longo de seu comprimento de forma periódica - criando-se uma rede de Bragg no interior da fibra. A vantagem deste sistema é a possibilidade de gravação de FBGs com diferentes comprimentos de onda utilizando apenas uma máscara de fase e variando-se o ângulo dos espelhos. Porém, além deste método reduzir a potência do LASER que chega à fibra ótica devido às reflexões que ocorrem no espelho, também exige um alinhamento ótico preciso para garantir a simetria dos feixes. Durante o processo de gravação ocorre o aumento da refletividade da rede, como pode ser observado na Figura 2.7, na qual é apresentada a curva de crescimento em função do tempo para uma rede de Bragg pelo método de gravação direto.

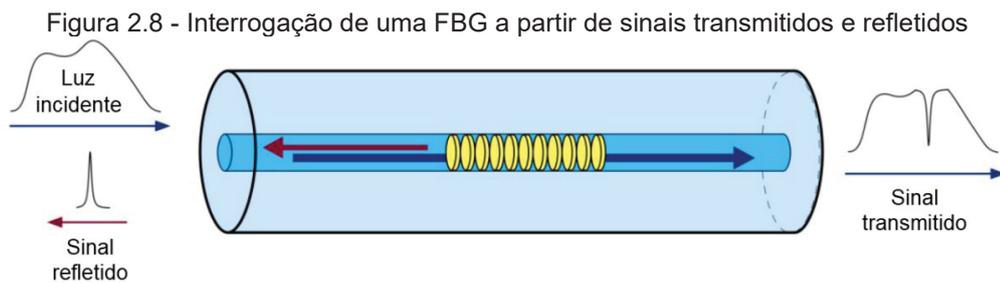
Figura 2.7 - Interrogação de uma FBG durante a gravação a partir de sinais transmitidos e refletidos



Autor: Autoria própria, baseado em Hill et al. (1978)

No início da curva de crescimento é observado os 4% de refletividade referentes a reflexão de Fresnel (retorno da luz à fonte luminosa devido à reflexão na entrada e saída da fibra). Nos detalhes da Figura 2.7 é possível observar os espectros de reflexão e transmissão da rede ao final do processo de gravação.

Após a produção do sensor ótico, o processo de aquisição de dados ou interrogação de uma FBG consiste em acoplar uma fonte de luz de banda larga na fibra, de forma a monitorar o espectro ótico da luz transmitida ou refletida pela FBG, como pode ser observado na Figura 2.8 (YIN; RUFFIN; YU, 2008).



Autor: Traduzido de Gouveia, Batista e Jorge (2013)

O comprimento de onda do pico que surge após o processo de gravação é descrito pela Equação 2.1, na qual λ_b é o comprimento de onda de Bragg, n_{ef} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra, e Λ é a metade do espaçamento entre as grades da máscara de fase, conhecido como o período (DAUD; ALI, 2018; KASHYAP, 2010).

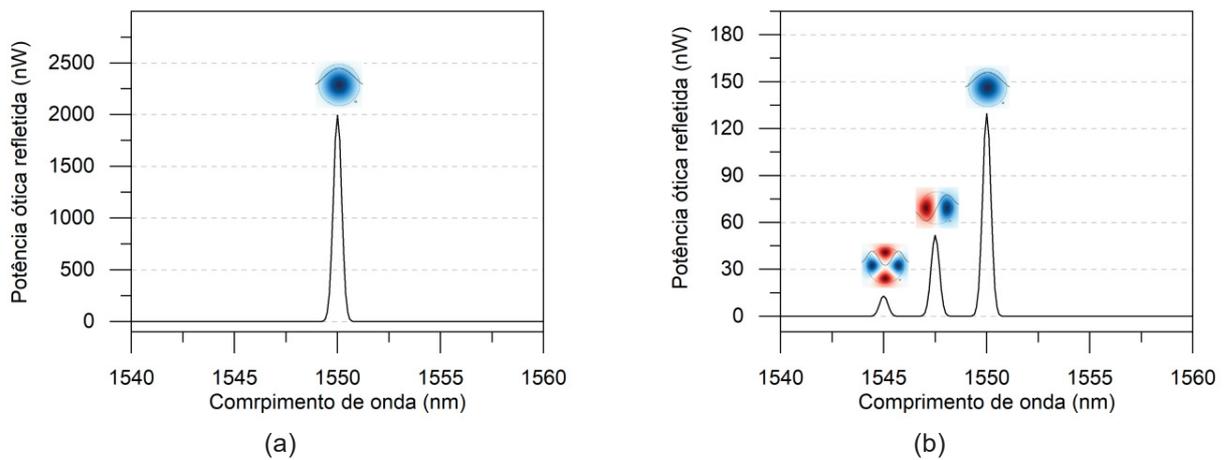
$$\lambda_b = 2 \cdot n_{ef} \cdot \Lambda$$

2.1

A partir da propriedade de reflexão da luz, o sinal refletido pode ser calibrado em função de alterações causadas no sensor. Quando a fibra sofre deformações axiais ou mudanças de temperatura, ocorre alteração no espaçamento da microestrutura e, conseqüentemente, do comprimento de onda de Bragg. Também há alguma variação no índice de refração, proveniente do efeito fotoelástico. Estes efeitos são independentes para cada rede de Bragg existente em um trecho de fibra ótica (KASHYAP, 2010; OTHONOS, 1998).

Fibras monomodo gravadas com redes de Bragg apresentam um único pico referente ao comprimento de onda de Bragg refletido. Já fibras óticas multimodo apresentam em seu espectro refletidos múltiplos picos (referente aos modos secundários de propagação), como apresentado na Figura 2.4. Espectros de redes de Bragg gravadas em fibras monomodo e multimodo, utilizando uma mesma máscara de fase, podem ser observadas na Figura 2.9.

Figura 2.9 - Espectros refletidos em fibras óticas com mesmo comprimento de onda: (a) monomodo e (b) multimodo



Fonte: Autoria própria, baseado em Okamoto (2006)

Sobre cada pico é apresentado o perfil de intensidade referente à cada modo de propagação. Modos secundários podem ser utilizados para a calibração de diferentes variáveis. Redes de Bragg gravadas em fibras multimodos costumam apresentar menor intensidade no seu espectro (menor refletividade), porém maior resistência mecânica. Ainda assim, a maior parte dos sensores óticos são desenvolvidos em fibras monomodo devido à sua simplicidade e facilidade de detecção (KUHNE, 2016). Por este motivo, os ensaios desta tese foram realizados utilizando fibra monomodo padrão para telecomunicações G-652 (Figura 2.4).

Durante a gravação, as grades formadas podem ser classificadas como tipo I ou tipo II. Geralmente as redes do tipo I são gravadas em laser de emissão contínua em fibras padrão, podem operar na faixa de -40°C e 80°C e são apagadas em temperaturas próximas à 200°C . Estas redes poderiam ser aplicadas no monitoramento externo de estruturas, uma vez que podem operar em temperaturas ambiente.

Já as redes do tipo II costumam ser gravadas em LASER pulsado de alta intensidade, que podem causar, além da alteração do índice de refração, mudanças estruturais e defeitos no vidro. Este segundo tipo possui estabilidade térmica de até 800°C (OLIVEIRA, 2012; OTHONOS; KALLI, 1999; SILVA, 2005). Portanto, redes do tipo II seriam indicadas para aplicação no monitoramento do calor de hidratação do concreto, que em blocos de fundação podem passar de 65°C (COUTO; HELENE; ALMEIDA, 2016).

2.2.2 Calibração da FBG

Os sensores óticos são codificados no comprimento de onda, permitindo medir eventos pelo desvio deste comprimento de onda. Isto é útil porque as medições não dependem apenas da amplitude do sinal, que pode ser alterada por desalinhamentos óticos, curvas de fibra ou envelhecimento do sistema de medição. Por este motivo, múltiplos sensores FBG podem ser colocados em uma única fibra ótica e podem estar separados por apenas alguns milímetros ou por vários quilômetros de distância, pois cada sensor irá produzir picos de reflexão ou transmissão de luz de acordo com o comprimento de onda de Bragg durante sua gravação. Assim, um mesmo canal ótico pode monitorar diferentes trechos do espectro, desde que uma banda espectral suficiente seja reservada para cada sensor. Com o revestimento apropriado, cada uma destas microestruturas pode se tornar sensível a diferentes parâmetros tornando-os, assim, sensores com características multifuncionais conhecidos também como sensores multiplexados (OLIVEIRA, 2012; XU; WANG; MIAO, 2017).

Sensores óticos multiplexados podem ser utilizados, dentre outras aplicações, para realizar medições simultâneas de deformações, deformações em diferentes sentidos ou a leitura simultânea de temperatura e deformação. Para a correta interpretação dos sinais, é essencial que não ocorra sobreposição das bandas durante os ensaios, assim, cada rede deve apresentar comprimentos de onda de Bragg distintos (PEREIRA; FRAZAO; SANTOS, 2004).

A sensibilidade à deformação específica ($\Delta\varepsilon$) e à temperatura (ΔT) de um sensor FBG pode ser determinada pela variação do comprimento de onda do espectro ($\Delta\lambda_b$), conforme descrito pela Equação 2.2 (DAUD; ALI, 2018; LEUNG et al., 2015).

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = (1 + p_e) \cdot \Delta\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T \quad 2.2$$

Sendo p_e a constante fotoelástica (-0,212), α_Λ o coeficiente termo-ótico ($8,3 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) e α_n o coeficiente de expansão térmica da fibra ($0,55 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) (DAUD; ALI, 2018; GRATTAN; MEGGITT, 1998).

Assim, para um comprimento de onda de 1550nm em fibra monomodo padrão, a sensibilidade de uma FBG para leituras de temperatura se encontra na faixa de 13 pm/ $^\circ\text{C}$ (DAUD; ALI, 2018; GRATTAN; MEGGITT, 1998; LI et al., 2019; OLIVEIRA, 2012; PEREIRA; FRAZAO; SANTOS, 2004) e para leituras de deformação específica na faixa 1,2 pm/ $\mu\text{m}/\text{m}$ ou

1,2 pm/ $\mu\epsilon$ (GRATTAN; MEGGITT, 1998; LI et al., 2019; YOU; REN; SONG, 2019). Assim, o sensor é cerca de 10 vezes mais sensível à temperatura do que à deformação específica, e o uso de pares de FBG para compensação térmica dos efeitos simultâneos durante a aplicação do sensor é essencial para garantir a precisão das leituras em ambientes sem controle térmico.

Para sensores multiplexados, assumindo que os efeitos de temperatura e deformação são independentes, seus efeitos simultâneos podem ser descritos pela Equação 3.1 (GRATTAN; MEGGITT, 1998; OTHONOS, 1998), na qual $\Delta\lambda_b$ representa a variação do comprimento de onda de Bragg de cada FBG trabalhando em comprimentos de onda diferentes; K_ϵ e K_T são as sensibilidades à deformação específica e à temperatura, e $\Delta\epsilon$ e ΔT são as variações na deformação específica e temperatura, respectivamente, para cada FBG (1 e 2).

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{b1} \\ \Delta\lambda_{b2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\epsilon1} & K_{T1} \\ K_{\epsilon2} & K_{T2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad 2.3$$

A sensibilidade dos sensores sofre grande variação devido à diferentes metodologias utilizadas em sua fabricação (tipo de fibra, tipo de laser, período da máscara, método de gravação, método de calibração, ângulo de gravação, entre outros). Portanto, toda aplicação deste tipo de sensor deve ser precedida de uma etapa de calibração e definição dos coeficientes de sensibilidade (K_ϵ e K_T), se possível de forma experimental (LI et al., 2019; MAJUMDER et al., 2008). Portanto, estudos ainda necessitam ser realizados de forma a compreender os efeitos da produção, caracterização e aplicação dos sensores em fibra ótica.

Não foi possível encontrar na literatura brasileira nenhuma norma, resolução ou manual que indique o processo de fabricação, manuseio, calibração e aplicação de sensores óticos; ainda que estes sensores sejam vendidos comercialmente para aplicações industriais. A única normativa internacional existente sobre o tema é a IEC 61757 (IEC, 2018), que traz uma especificação genérica que abrange as fibras óticas independentemente do tipo de aplicação ou instalação. Existem outras instituições que trabalham na normalização deste tipo de sensor como: o grupo de trabalho da *Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* (ISHMII), o comitê “*Fiber Optics and Applied Photonics*” da *Society of Automotive Engineers* (SAE), o comitê técnico F36 “*Technology and Underground Utilities*” da ASTM e o grupo de trabalho da *Global Optical Fiber Sensing System* (OFSS) (HABEL; KREBBER;

DAUM, 2015). Este panorama reforça a necessidade de requisitos normativos para a correta fabricação, calibração e aplicação de sensores em fibra ótica.

2.3 ENCAPSULAMENTO DA FBG PARA USO EM CONCRETO

Devido à variedade de materiais, condições ambientais, métodos de instrumentação e tipos de sensores em fibra ótica, é difícil encontrar diretrizes gerais para a instalação dos sensores. Porém, para qualquer forma de aplicação, é necessário garantir a proteção do sensor e a correta aderência do mesmo ao material que será instrumentado (DU et al., 2019; KHADOUR; WAEYTENS, 2018).

Para a utilização de FBG na medida de deformações no concreto, é comum sua instalação na superfície dos elementos estruturais. Pois um ambiente alcalino como o do concreto em contato direto com a sílica do vidro pode trazer problemas a longo prazo durante o monitoramento de estruturas (FIDANBOYLU; EFENDIOGLU, 2009; LI; LI; SONG, 2004).

Este problema é crítico na região do sensor que teve sua camada de proteção polimérica (acrilato) removida para a gravação da FBG. Indica-se, portanto, a inserção do sensor no interior de tubos ou seu revestimento com material de altas resistência e aderência. Esta técnica de proteção superficial de sensores em fibra ótica é conhecida como encapsulamento (BANDT NETO, 2018; BATISTA, 2017).

Para a utilização da FBG no monitoramento do concreto armado, Glisic e Inaudi (2007) indicam a colagem do sensor nas barras de aço antes da concretagem, ou embeber o sensor em um material compósito como resinas e fibras de carbono, por exemplo. Em outros casos, o sensor pode ser inserido em material mais homogêneo, mas que seja mecanicamente compatível com o concreto - como o embutimento da FBG em pequenas peças de argamassas.

Quando uma fibra é embutida em outro material, pode ocorrer a alteração da sensibilidade do sensor devido a deformações transversais ao eixo da fibra. Li et al. (2019), por exemplo, verificaram um aumento de até 8 vezes na sensibilidade à deformação específica de FBGs recobertas por resina epóxi. Isto é particularmente verdadeiro no caso de sensores interferométricos (como FBGs), onde uma pressão transversal mudará o índice de refração da fibra de vidro devido ao efeito de birrefringência - propriedade de materiais que apresentam diferentes índices de refração para diferentes direções de propagação da luz (MITSCHKE,

2016). Esta mudança será interpretada incorretamente como uma variação de deformação axial. Portanto, é necessário eliminar qualquer deformação transversal que possa surgir (GLISIC; INAUDI, 2007; MAJUMDER et al., 2008).

Os principais métodos de encapsulamento de FBGs comerciais são a inserção da fibra no interior de tubos capilares e chapas metálicas recobertas por um material protetor, ou sua inserção em compósitos poliméricos (MAJUMDER et al., 2008). Como a fibra precisa ser tencionada para sua fixação no interior dos tubos capilares, permitindo medidas positivas e negativas de deformação, o processo de embutimento causa o deslocamento do pico refletido pelo sensor para maiores comprimentos de onda. Durante a medida de temperatura, o sensor encapsulado pode levar alguns minutos para a estabilização térmica, como observado por Bandt Neto (2018). Já a leitura de carregamentos pode sofrer atrasos de até 5 segundos devido ao encapsulamento (MAJUMDER et al., 2008).

2.3.1 Encapsulamento em tubos metálicos longos

Empresas especializadas em sensores óticos fornecem diversos tipos de encapsulamentos em tubos metálicos, para inserção durante a concretagem ou fixação externa, como pode ser observado na Figura 2.10. Contudo, nenhuma informação sobre o material utilizado, sobre sua construção ou sensibilidade são disponibilizadas pelos fabricantes.



Fonte: HBM (2020)

Os encapsulamentos apresentados na Figura 2.10, em tubos metálicos, são destinados à instrumentação de grandes elementos estruturais como blocos de fundação, longarinas de pontes ou maciços de barragens. Este tipo de encapsulamento altera ainda a forma com que as leituras são realizadas, pois, ao invés de medir a deformação específica

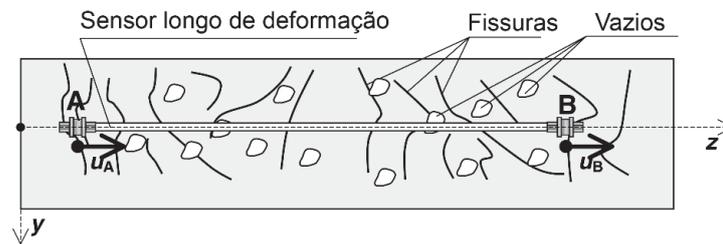
pontual (cerca de 3 mm) como acontece com extensômetros, a medida realizada passa a ser ao longo de dois pontos de ancoragem, de forma semelhante a transdutores de deslocamento.

Não há consenso na literatura de qual o comprimento ideal do encapsulamento para monitoramento do concreto. Dunant e Scrivener (2012) utilizaram FBGs encapsuladas em tubos de 100 mm e indicam que o comprimento de engaste do sensor deve ser de pelo menos quatro vezes o diâmetro máximo dos agregados. Yazdizadeh, Marzouk e Hadianfard (2017) utilizaram um encapsulamento de 150 mm em cilindros de Ø100x200 mm de concreto para monitorar a retração por secagem e fluência. Du et al. (2019) afirmam que o comprimento de ancoragem no encapsulamento para aplicações em concreto deve se superior à 60 mm e que tubos capilares de aço inoxidável são os mais indicados; Childs et al. (2008) obtiveram uma elevada precisão utilizando comprimentos de ancoragem de 70 mm. Destaca-se ainda que alguns autores utilizaram comprimentos inferiores a 10 mm (LAU et al., 2001; MEC et al., 2018) e superiores a 240 mm (LI; WU, 2009).

O uso de FBGs tracionadas com ambas as extremidades fixas é ideal tanto para leituras de deformação quanto para efetuar a compensação de temperatura, sendo que o efeito de compensação de temperatura está relacionado não apenas ao método de encapsulamento da FBG, mas também à taxa de mudança de temperatura. Sendo que o uso de diferentes materiais não alterara a sensibilidade do sensor, porém o tempo de resposta dos sensores encapsulados variaram de forma proporcional à condutividade térmica dos materiais utilizados no encapsulamento (LAU et al., 2001; LI; WU, 2009; MEC et al., 2018; XIONG et al., 2019).

Ainda que a leitura pontual da temperatura e deformação específica do material possa fornecer informações importantes, caso ocorram falhas ou danos em locais não instrumentados pelo sensor, estas informações não serão coletadas. Assim, sensores longos encapsulados permitem o monitoramento da estrutura como um todo, de modo que qualquer fenômeno que tenha impacto sobre o comportamento estrutural global seja detectado e quantificado. Esta configuração é essencial na instrumentação de materiais heterogêneos como o concreto, permitindo, assim, a avaliação de descontinuidades e fissuras que poderão surgir ao longo da vida útil do elemento (GLISIC; INAUDI, 2007). Na Figura 2.11 é possível observar um sensor FBG encapsulado dentro de uma peça de concreto contendo vazios e fissuras. Desta forma, o sensor pontual se torna um sensor longo e será capaz de acompanhar a abertura e propagação destas descontinuidades ao longo do tempo entre os pontos A e B.

Figura 2.11 - Encapsulamento para medidas internas do concreto entre os pontos de ancoragem A e B



Fonte: Traduzido de Glisic e Inaudi (2007)

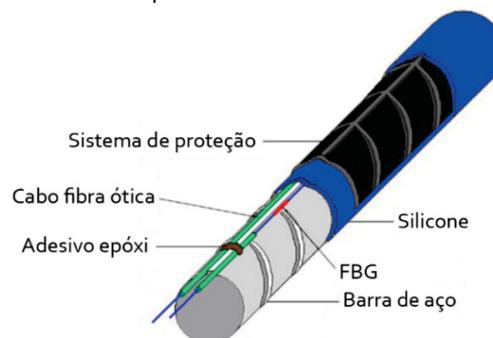
Arranjos com pares de sensores paralelos, sensores distribuídos ao longo das seções, combinação de sensores longos encapsulados e pontuais, bem como arranjos tridimensionais podem ser aplicados para uma melhor avaliação, dependendo do tipo de carregamentos e deformações aos quais a estrutura está submetida (GLISIC; INAUDI, 2007).

Detalhes acerca da calibração da sensibilidade à deformação de sensores encapsulados em tubos metálicos não foram encontrados, uma vez que os autores descrevem apenas processos de calibração térmica (utilizando banho térmico, em sua maioria).

2.3.2 Fixação em barras metálicas

Como alternativa ao encapsulamento, no caso de medidas de deformações em elementos metálicos, outros autores optam pela simples fixação do sensor sobre a superfície do material e proteção do sensor com resinas e colas (Figura 2.12), uma vez que o embutimento de tubos e peças metálicas de grandes dimensões pode inviabilizar o uso do sensor e alterar sua precisão.

Figura 2.12 - Encapsulamentos de FBG nas armaduras



Fonte: Traduzido de Kister et al. (2007)

Almubaied et al. (2017) destacam que para medidas de deformação em barras de aço utilizando FBG é interessante impedir o contato direto do sensor com o concreto para que as leituras de deformação da barra não sofram influência de fenômenos do concreto como retração por secagem. Kaklauskas et al. (2019) embutiram a FBG dentro das barras de aço bipartidas e utilizaram epóxi para a fixação do sensor e fechamento da barra. A fixação do sensor em uma placa ou nas armaduras também evita movimentações laterais e curvaturas da fibra durante a concretagem (MAASKANT et al., 1997). Rodrigues et al. (2010), por exemplo, fixaram a FBG em uma barra de aço inox de 16 mm de diâmetro e 1 m de comprimento com ranhuras e pontos de ancoragem nas extremidades.

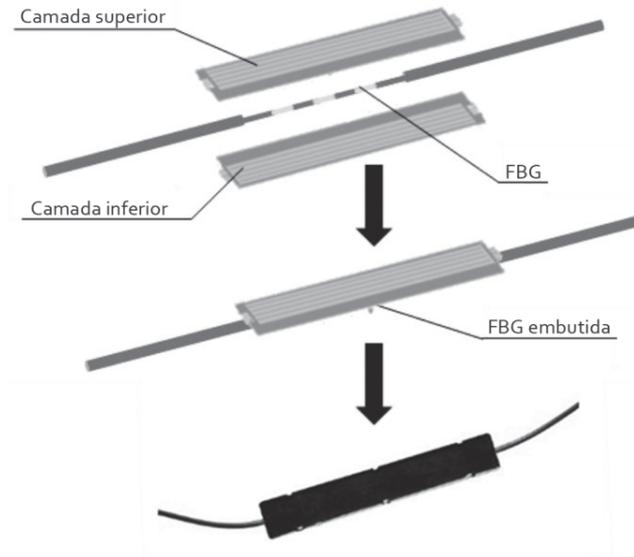
Fan et al. (2019) realizaram medidas de expansão de barras de aço dentro do concreto durante a corrosão utilizando FBG, e enrolaram o sensor em forma de espiral ao redor da barra sem o uso de cola e realizaram concretagem. Mao et al. (2015) e Zheng, Sun e Lei (2009) também aplicaram FBG em barras de aço, fixando e protegendo a fibra com cola epóxi. Almubaied et al. (2017) utilizaram poliestireno expandido como proteção superficial pois, segundo os autores, o material isola o sensor da pasta de cimento, mas permite deformações da fibra na barra. Contudo, a medida de deformações na estrutura a partir da instrumentação de barras de aço pode sofrer influência de fenômenos de corrosão das barras, não sendo indicado para monitoramento de longo prazo do concreto. Além disso, parte dos estudos apresentou rompimento das fibras durante os ensaios realizados.

2.3.3 Embutimento em compósitos polímeros

Outra opção muito utilizada para o encapsulamento dos sensores é o embutimento da FBG em um material protetor, normalmente composto por polímeros, podendo ser reforçado com fibras, como pode ser observado na Figura 2.13.

Castro-Caicedo, Toores e Lain (2013) observaram que a espessura da camada de epóxi e o módulo elástico do adesivo não influenciaram as leituras realizadas com FBG, ainda que Grattan e Meggitt (1999) indiquem o uso de polímeros de alto módulo elástico para garantir a transferência de tensões ao concreto.

Figura 2.13 - Encapsulamentos de FBG em compósitos poliméricos



Fonte: Autoria própria, baseado em Torres et al. (2011)

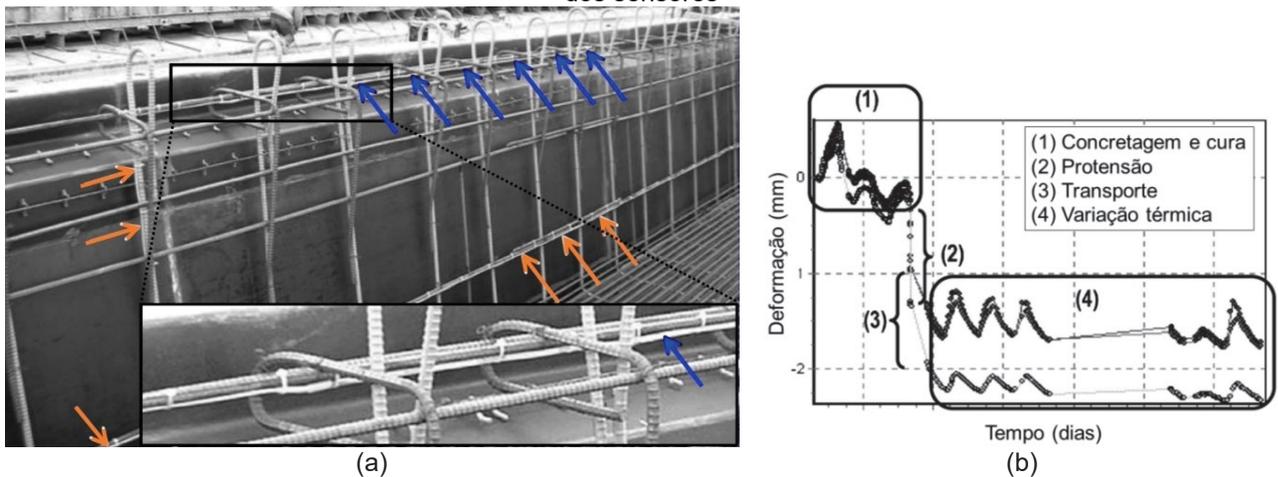
A geometria da camada adesiva e as propriedades do material influenciam a quantidade de tensão transferida do material hospedeiro para o sensor (LI; ZHOU; OU, 2004; LIANG et al., 2018; RAJAN; PRUSTY, 2016). Lau et al. (2001) observaram que para a correta transferência de tensão do material protetor para os sensores FBG, é necessário que seja aplicada uma camada fina de adesivo, que o material de revestimento tenha alto módulo elástico e o comprimento de embutimento seja adequado à geometria da peça. Não só a espessura da camada tem efeito na transferência de tensão, mas também o comprimento do embutimento desempenha papel importante na quantidade de tensão transferida. Zhou et al. (2012) avaliaram o erro teórico na transferência de tensão entre o embutimento em polímero reforçado com fibra em função da espessura do material monitorado e da espessura da camada do polímero. Com base nos resultados obtidos pelos autores, para aplicações em concreto, camadas de polímeros de espessuras de 1mm e comprimento acima de 50 mm já reduzem significativamente erros referente a transferências de tensão entre o concreto e o sensor ótico.

Todavia, outros trabalhos não realizaram nenhum tipo de encapsulamento ou proteção superficial no sensor (CAMPOPIANO et al., 2014; FAN et al., 2019; GAO et al., 2011; GRATTAN et al., 2009). Os autores justificaram o não encapsulamento dos sensores pelo fato de que os ensaios foram realizados em um curto período, as instrumentações eram externas ao concreto e que este se encontrava em estado íntegro (sem descontinuidades).

2.4 APLICAÇÕES DA FBG NA ENGENHARIA CIVIL

Fidanboylyu e Efendioglu (2018) e Majumder et al. (2008) destacam que a FBG pode ser utilizada em diversos tipos de estruturas, e em diferentes fases da construção, uma vez que é possível realizar o monitoramento: do concreto durante a construção, de fissuras (comprimento e velocidade de propagação), protensão, medição de deslocamento espacial, evolução da linha neutra, deformação a longo tempo (fluência e retração), interação concreto-aço, avaliação de danos pós-sísmicos, detecção de danos nas juntas, recalque de fundações, variação térmica, integridade de restauração e interação de ligações estruturais. Um exemplo de instalação de FBG encapsulada dentro de vigas de concreto pode ser observada na Figura 2.14.

Figura 2.14 - Exemplo de fixação de sensores em vigas armadas de concreto: (a) instrumentação e (b) leitura dos sensores



Fonte: Traduzido de Glisic e Inaudi (2007)

Na Figura 2.14a, as setas na cor azul indicam o posicionamento do sensor encapsulado em tubos metálicos presos à armadura, enquanto as setas na cor laranja indicam a passagem dos cabos pela armadura. Na Figura 2.14b, é possível observar os efeitos do calor de hidratação gerado durante a cura do cimento Portland, deformações devido à protensão da viga, bem como efeitos de variação térmica no elemento durante a construção da estrutura. Portanto, ainda na etapa de construção, o uso de FBGs no concreto pode auxiliar na detecção de falhas e no controle tecnológico do concreto, além do monitoramento estrutural após a conclusão da obra.

O mais sofisticado sistema de monitoramento de pontes do mundo está localizado em Hong Kong, com custo de implantação de 1,3 milhão de dólares (em 1997), usado para garantir o conforto e a segurança dos usuários em 3 pontes. Com cerca de 350 sensores na ponte Tsing Ma, 350 na Ting Kau e 200 na Kap Shui Mun, o comportamento estrutural das pontes é monitorado 24 horas por dia, sete dias por semana. Os sensores incluem acelerômetros, extensômetros, transdutores de deslocamento, estações de detecção de nível, anemômetros, sensores de temperatura e sensores dinâmicos de peso e movimento. Eles medem a temperatura do asfalto, tensões nos elementos estruturais, velocidade do vento, deflexão e rotação dos cabos, movimento dos conveses e torres das pontes (KHAN, 2010). A maior parte dos sensores utilizados na instrumentação destas pontes são baseados em fibra ótica (MAJUMDER et al., 2008).

Mais de 2000 sensores óticos foram instalados em dezenas de pontes de concreto na Suíça (YIN; RUFFIN; YU, 2008). Johansson et al. (2023) afirmam que, em 2023, 85 barragens na Suíça possuem sistemas de monitoramento com sensores óticos distribuídos, totalizando mais de 70km de cabos. Na China, as 20 maiores pontes do país são instrumentadas com sistemas de monitoramento da integridade estrutural e de controle de tráfego (KO; NI, 2005), sendo que os sistemas incluem análise de dados em tempo real e alerta sonoro e por SMS aos usuários (DU et al., 2019). Tendo em vista que a maior parte das aplicações são em estruturas chinesas e realizadas por empresas especializadas, detalhes sobre os sistemas de monitoramento são escassos e muitas vezes em línguas de difícil tradução.

Na Tabela 2.2 são listadas as pontes que atualmente contam com sistemas de instrumentação utilizando algum tipo de sensor em fibra ótica, considerando a revisão da literatura realizada (CHANG; FLATAU; LIU, 2003; DU et al., 2019; FIDANBOYLU; EFENDIOGLU, 2009; FUHR; SPAMMER, 1998; GLISIC; INAUDI, 2007; GRATTAN; MEGGITT, 1999; KHADOUR; WAEYTENS, 2018; KO; NI, 2005; LEUNG et al., 2015; LI; LI; SONG, 2004; MAASKANT et al., 1997; RAJAN; PRUSTY, 2016). Vale destacar, contudo, que parte dos sensores óticos aplicados em estruturas de pontes e barragens são distribuídos, baseados no retro espalhamento da luz na fibra, e não permitem a medida pontual de deformações – diferente dos sensores pontuais tipo FBG foco deste estudo.

Tabela 2.2 - Estruturas instrumentadas com sensores óticos

Estrutura	País	Nome
Ponte	Canadá	Beddington Trail Bridge, Confederation Bridge, Dongying Yellow River Bridge, Taylor Bridge
Ferrovias	China	Shuohuang Railway
Ponte	China	Badong Yangtze Bridge, Chongqing Yangtze River Bridge, Dadu River Arch Bridge, East Sea Bridge, Hangzhou Bay Bridge, Hemaxi Grand Bridge, Hulan River Bridge, Liaohe Grand Bridge, Messina Strait Bridge, Nanjing Yangtze River Bridge, Qianjiang Bridge, Shanghai Chongming Crossing, Shenzhen Western Corridor, Stonecutters Bridge, Sutong Bridge, Tsing Ma Bridge, Wuhu Yangtze River Bridge, Xiaogou Grand Bridge,
Ponte	Coréia	Seohae Bridge
Ponte	Dinamarca	Great Belt Bridge
Barragem	Espanha	CanalesDam
Ponte	Estado Unidos	Streicker pedestrian bridge, Commodore Barry Bridge, Interstate Highway 10 Bridge, Waterbury Bridge
Ponte	Itália	Port of Marghera Bridge
Ponte	Japão	Akashi Kaikyo Bridge
Barragem	Letônia	Plavinu hes Dam
Ponte	Portugal	Ponte Luiz I
Ponte	Rússia	Bolshoi Moskvoretskiy Bridge
Ponte	Suécia	Gotaalvbron Bridge
Barragem	Suíça	Emosson Dam, Luzzone Dam, Luzzone Dam
Ponte	Suíça	Lutrive Bridges, Siggenthal Bridge, Storck Bridge, Versoix bridges
Túnel	Suíça	Champ Baly tunnel, Mont-Terri Tunnel

Fonte: Dados compilados pelo autor

Além do monitoramento da integridade estrutural, sensores em fibra ótica têm sido largamente utilizados em pesquisas. Utilizando FBG alguns autores já avaliaram a deformação de peças estruturais (FAJKUS et al., 2018; MAJUMDER et al., 2008; MEC et al., 2018; QUINTELA et al., 2002; RODRIGUES et al., 2010; SAOUMA et al., 1998; SAOUMA; PEROTTI, 2006; WANG et al., 2000), a transferência de tensão do concreto para o aço (KAKLAUSKAS et al., 2019), carregamentos em fundações (KISTER et al., 2007), coeficiente de expansão térmica de materiais de construção (HONG et al., 2012) e deformações devido à corrosão (GAO et al., 2011). Além disso, testes dinâmicos e de vibração também já foram realizados (LEE; TSUDA; TOYAMA, 2007; LENG; ASUNDI, 2002).

Outros pesquisadores avaliaram a retração (CAMPOPIANO et al., 2014; SLOWIK; SCHLATTNER; KLINK, 2004) e fluência (DUNANT; SCRIVENER, 2012; LI et al., 2013; YAZDIZADEH; MARZOUK; HADIANFARD, 2017) em peças de concreto sob carregamento constante com sensores óticos externos às peças. A maioria dos autores realizou apenas o monitoramento estrutural referente a deformações geradas por carregamentos (FAJKUS et al., 2018; FIDANBOYLU; EFENDIOGLU, 2009; LI et al., 2013; LI; LI; SONG, 2004; MAJUMDER et al., 2008; MEC et al., 2018; QUINTELA et al., 2002; WANG et al., 2000). Estudos utilizando

FBG na avaliação da degradação ao longo do tempo em estruturas de concreto, como mecanismos expansivos, não foram localizados durante a revisão da literatura.

Alguns estudos utilizando sensores óticos foram feitos para acompanhar processos de corrosão do concreto armado. Como método indireto, já foram utilizados sensores óticos para verificar a expansão das barras de aço durante a formação de óxido de ferro e a expansão dos produtos da reação de corrosão (ALMUBAIED et al., 2017; BAO et al., 2015; GAO et al., 2011; HASSAN et al., 2012; HU et al., 2011; ISLAM et al., 2015; MAO et al., 2015; ZAMARREÑO et al., 2015; ZHENG; SUN; LEI, 2009). Técnicas de interação da fibra ótica com as barras corroídas ou utilizando a deposição de filmes finos sobre o sensor também já foram avaliadas (FUHR; SPAMMER, 1998; HASSAN et al., 2012; HU et al., 2011; LI; LI; SONG, 2004; LO; XIAO, 1998; TAN et al., 2017, 2016; VENANCIO et al., 2013; ZAMARREÑO et al., 2015). Contudo, Bertolini et al. (2013) destacam que para avaliar a corrosão de armaduras, métodos eletroquímicos possuem a vantagem de serem aplicáveis à modelos de vida útil, enquanto medidas de corrosão por deformação utilizando FBG não permitem o prognóstico das estruturas e sofrem interferência de diversos parâmetros externos.

3 FABRICAÇÃO, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SENSOR FBG

3.1 INTRODUÇÃO

A manutenção preditiva é baseada na verificação das condições dos equipamentos, tendo como premissa programar intervenções nas máquinas, com base em indicadores dos próprios equipamentos (CHANG; FLATAU; LIU, 2003). Na construção civil, esta técnica é utilizada na área de monitoramento estrutural, quando são realizadas medidas em tempo real nos elementos da estrutura de forma a constatar alterações em suas propriedades ao longo do tempo. Este monitoramento, na manutenção preditiva, permite intervenções planejadas, pontuais, com custo reduzido e de forma eficiente (GLISIC; INAUDI, 2007).

Para a implantação de um sistema de monitoramento estrutural (SHM ou *structural health monitoring*) é necessário o uso de sensores, amplificadores de medição e *softwares* de aquisição, análise e transmissão de dados. A correta instalação e manutenção dos sensores são indispensáveis para assegurar a eficácia do sistema de monitoramento estrutural. Neste sentido, qualquer sensor que seja utilizado precisa ser bem estudado, desde a sua concepção até a interpretação dos sinais (ALAMPALLI; MOREAU, 2016).

No monitoramento estrutural, a realização de medidas de deslocamentos e deformações específicas são as mais realizadas em estruturas. Em barragens afetadas por RAA, os dados mais observados em sistemas de instrumentação são: alteamento da crista da barragem; deslocamentos horizontais da crista; deformações internas da estrutura; deslocamentos diferenciais entre blocos; deslocamentos angulares da barragem; subpressões na interface concreto/rocha e alterações nas vazões de drenagem (SILVEIRA, 2006). Ainda que a principal consequência sejam deformações verticais no maciço, a mesma pode ser mascarada pelo fenômeno da fluência nos primeiros anos de construção (BATISTA; GOMES, 2016).

Assim, considerando um material íntegro em regime elástico, o nível de deformação de uma estrutura depende diretamente de seu módulo de elasticidade, que sofre variações a depender da alteração de sua microestrutura ou deformações plásticas (permanentes) durante processos de degradação. Assim, o módulo de Young ou módulo de elasticidade é uma propriedade mecânica que representa a medida da rigidez de um material sólido (ZECH; SETZER, 1988, 1989). É uma propriedade intrínseca dos materiais que depende da

composição química, microestrutura e defeitos, podendo ser obtida pela razão entre a tensão normal solicitada e a deformação específica sofrida pelo material (HEWLETT; LISKA, 2019).

No caso da RAS, por exemplo, o módulo de elasticidade é a principal propriedade do concreto afetada ao longo do tempo devido ao quadro de fissuração produzido pelas expansões internas que, por consequência, também afetam a resistência do material (HASPARYK, 2022a). Os dados obtidos através do monitoramento das propriedades do concreto devem ser utilizados para a correta calibração dos modelos numéricos estruturais até convergência do comportamento do modelo com os dados históricos de monitoramento (ANDRADE; TRAUTWEIN; BITTENCOURT, 2013; SANTIAGO; KROETZ; BECK, 2019), permitindo assim, a correta avaliação necessidade de intervenção na estrutura.

A determinação desta propriedade é essencial para o cálculo dos estados limites das estruturas, definidos pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e por outras normas de projeto estrutural. Mindess, Young e Darwin (2003) destacam que a partir do módulo elástico é possível, por exemplo, estimar o tempo de retirada das escoras durante a construção, verificar deformações excessivas em vigas, estimar limites de descompressão, abertura de fissuras e vibrações em estruturas. Assim, toda a análise estrutural depende diretamente do módulo elástico dos materiais.

Isto posto, durante a avaliação de uma estrutura, existem diferentes técnicas e tipos de sensores que podem ser utilizados na determinação do módulo de elasticidade. Ainda que esta propriedade possa ser estimada a partir da resistência à compressão, a propriedade também pode ser obtida experimentalmente por ensaios quase-estáticos ou dinâmicos (não destrutivos), muito utilizados no diagnóstico de estruturas existentes.

Nos ensaios quase-estáticos uma carga é aplicada uniformemente sobre uma seção e a deformação específica referente ao carregamento é medida durante o ensaio destrutivo (BASTGEN; HERMANN, 1977). Esta metodologia é a mais utilizada para a caracterização do módulo elástico em concretos ou testemunhos retirados dos elementos estruturais, e é normatizada pela NBR 7680 (ABNT, 2015).

A medida da deformação específica durante o ensaio estático costuma ser feita utilizando extensômetro elétrico de resistência ou transdutores de deslocamento na amostra, como LVDTs (transdutores indutivos) e relógios comparadores (transdutores mecânicos) (GIDRÃO, 2015; HAN; KIM, 2004; KOCAB et al., 2017; LIU et al., 2014; MONTIJA, 2007; ZHOU et al., 2015). De forma semelhante, durante ensaios de compressão, alguns autores já utilizaram FBG no monitoramento da deformação específica do concreto durante o ensaio de

compressão para o cálculo do módulo elástico estático (CASTRO-CAICEDO; TOORES; LAIN, 2013; REIS et al., 2009).

Para Mobley (2002), os ensaios dinâmicos têm como objetivo analisar o desempenho das estruturas, possibilitando assim a avaliação da segurança e a elaboração ou confirmação de modelos matemáticos existentes. Nos ensaios dinâmicos, o módulo elástico é determinado a partir da capacidade de propagação de ondas no interior do material. Por ser uma propriedade que pode ser obtida em uma mesma amostra (não destrutivo) ao longo de determinado período, a avaliação do módulo elástico dinâmico do concreto é largamente empregada em estudos de durabilidade do concreto.

Destaca-se que os ensaios dinâmicos não são afetados pela fluência, já que os níveis de vibração aplicados implicam em tensões muito baixas (MONTEIRO; HELENE; KANG, 1993). Por este motivo, Mehta e Monteiro (2013) consideram que o módulo de elasticidade dinâmico é aproximadamente igual ao módulo tangente à origem da curva tensão-deformação, determinado no ensaio estático e é, portanto, até 30% maior do que o módulo estático. Nos métodos dinâmicos, a determinação do módulo elástico depende diretamente da isotropia do material, das condições de apoio e da posição dos atuadores e receptores.

Para o ensaio de módulo dinâmico, é recorrente o uso da técnica de propagação de onda ultrassônica, normatizado pela ASTM C597 (ASTM, 2009) para aplicação em concretos (KOCAB et al., 2017; SILVA; CAMPITELI, 2008). Ainda na área dinâmica, a ASTM C215 (ASTM, 2014a) descreve a determinação do módulo dinâmico em amostras cilíndricas de concreto por excitação forçada utilizando acelerômetros (HAN; KIM, 2004; ZHOU et al., 2015).

De forma semelhante, as normas ASTM E1875 (ASTM, 2008a) e ASTM E1876 (ASTM, 2015) descrevem ensaios de vibração (para diferentes geometrias e materiais) pelas técnicas de excitação forçada e ressonância, respectivamente. Enquanto o primeiro método avalia a frequência amortecida do material após impacto, o segundo método detecta o fenômeno da ressonância quando o material é excitado de forma contínua em diferentes frequências.

Nas normativas ASTM E1875 (ASTM, 2008a) e ASTM E1876 (ASTM, 2015) o tipo de sensor a ser utilizado não é especificado, mas é necessário que ele seja capaz de realizar a aquisição de frequências ao longo do tempo. Com base na metodologia descrita por estas normas também é possível realizar os ensaios utilizando captadores acústicos (DIÓGENES et al., 2011; GIDRÃO, 2015).

Outro método que pode ser aplicado na determinação do módulo elástico de materiais é a indentação, uma técnica que avalia a penetração de sondas na superfície de uma amostra.

Este ensaio costuma ser realizado em escala reduzida (nano e microindentação) e, portanto, não possibilita a avaliação do módulo elástico do material como um todo. Apesar disso, o método já foi utilizado na avaliação do módulo elástico de fases cristalinas do cimento Portland, por exemplo (GARCIA et al., 2017; HAN; PAN; SUN, 2012; LI et al., 2016; MOUSAVI; CHESHOMI; ASHTARI, 2018). Na Tabela 3.1 é possível observar as principais contribuições deste estudo e os sensores utilizados por outros autores.

Tabela 3.1 - Estudos de monitoramento em estruturas

Medida realizada	Sensor utilizado					
	Transdutor de deslocamento	Extensômetro	FBG	Microfone	Acelerômetro	Ultrassom
Deslocamento	□ ●					
Deformação específica		□ ●	□ ●			
Frequência natural		□ ●	□ ●	□ ●	□ ●	
Amortecimento		□ ●	●	□ ●	●	
Módulo estático por flexão	●	□ ●	●			
Módulo dinâmico		●	●	□ ●	□ ●	□ ●
Referências	Penner (2001) Rodrigues et al. (2010) Zhou et al. (2015) Frotté et al. (2017) Montija (2007) Lee et al. (2017)	Penner (2001) Mec al. (2018) Kaklauskas et al. (2019) Montija (2007) Alsaman et al. (2017)	Quintela et al. (2002) Majumder et al. (2008) Silva et al. (2007) Rodrigues et al. (2010) Castro-Calcado, Toores e Lain (2013) Mec et al. (2018) Fajkus et al. (2018) Khadour e Waeytens (2018) Kaklauskas et al. (2019)	Diógenes et al. (2011) Bahr et al. (2013) Djayaprabha, Chang e Shih (2018) Gidrão (2015)	Penner (2001) Zhou et al. (2015) Dahlen, Ryden e Jakobsson (2015) Jin et al. (2017)	Karaiskos et al. (2015) Carrion et al. (2017) Jin et al. (2017) Lee et al. (2017)

□ - Literatura, ● - Este trabalho

Fonte: Autoria própria

Não foi possível encontrar na literatura trabalhos que tenham utilizado sensores óticos na determinação do módulo elástico estático por flexão ou do módulo elástico dinâmico de materiais. Tendo em vista a variedade métodos de ensaios existentes para a avaliação de elementos estruturais e determinação do módulo elástico, e os diferentes tipos de sensores que podem ser utilizados, faz-se necessário estudo que verifique a possibilidade de realizar estes ensaios com a utilização de sensores em fibras óticas, bem como comparar a FBG com outras técnicas na detecção de deformação específica, frequência natural, amortecimento e módulo elástico de materiais.

Isto posto, o objetivo deste capítulo foi: **determinar o melhor tipo de fibra para produzir sensores FBG; comparar leituras realizadas por FBG com sensores eletrônicos disponíveis no mercado; realizar medidas estáticas da deformação específica e cálculo do módulo estático e medidas dinâmicas da frequência de vibração, coeficiente de amortecimento e cálculo do módulo dinâmico em vigas de argamassa.** Assim, esta pesquisa visa contribuir com a comparação dos métodos existentes e validar o uso de FBG como sensor na determinação de parâmetros utilizados na caracterização de materiais e no cálculo estrutural, bem como no diagnóstico de estruturas existentes.

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Produção das vigas

Para a avaliação dos elementos estruturais, foi realizada a moldagem de prismas de argamassa utilizando cimento Portland CPV-ARI e agregado miúdo de origem natural. O agregado apresentou massa específica de $2,695 \pm 0,004 \text{ g/cm}^3$ de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009a) e módulo de finura de 2,36 de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

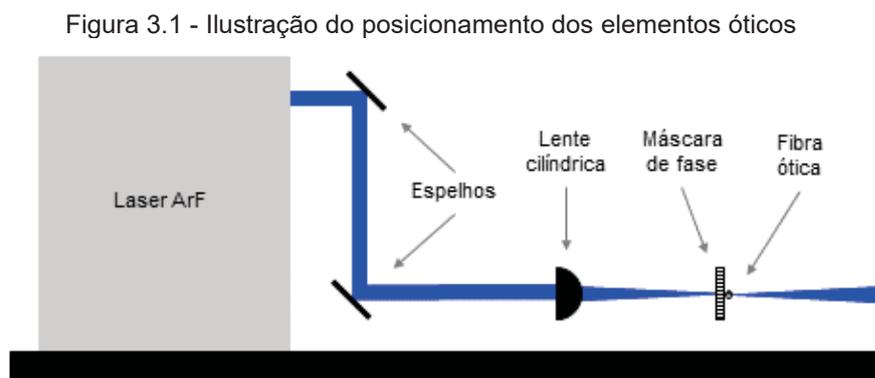
As argamassas foram confeccionadas utilizando traço de 1:3 em massa e relação água/cimento (a/c) de 0,48, conforme preconiza a NBR 7215 (ABNT, 1996a). Visando a realização de ensaios de vibração, os corpos de prova foram moldados no formato prismático (25x25x285) mm e em triplicata, desmoldados após 24h e submetidos a cura submersa em água saturada com cal à temperatura ambiente (22°C) até a idade de ensaio (28 dias). Também foram moldados corpos de prova cilíndricos ($\emptyset 50 \times 100$) mm que apresentaram, conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996a), resistência mecânica à compressão de 51,2 MPa aos

28 dias. O ensaio foi realizado em presa hidráulica (EMIC, DL30000) com o topo dos corpos de prova retificados.

3.2.2 Fabricação da FBG

Para a fabricação dos sensores óticos FBG foi avaliada a possibilidade de uso de fibra ótica monomodo padrão (Fibracem, G652) e fotossensível (Nufer, GF1), antes e após o processo de hidrogenação. Fibras fotossensíveis possuem maior teor de dopantes no núcleo e facilitam o processo de alteração do índice de refração durante à exposição à radiação UV. O processo de hidrogenação também facilita a quebra das ligações do silício e alteração do índice de refração durante a gravação. Para a hidrogenação das fibras óticas, trechos de 1m foram inseridos no interior de uma câmara com gás hidrogênio (H_2) 5.0 pressurizado a 100 kgf/cm^2 pelo período de 3 meses, garantindo, assim, a saturação da difusão do gás na fibra ótica – uma vez que a saturação do hidrogênio costuma ocorrer a partir de 15 dias de exposição (SILVA, 2005)

A gravação da rede foi realizada no comprimento de onda de Bragg de 1540,9 nm utilizando máscara de fase IBSEN com iluminação direta em laser exímero ArF (Coherent, modelo Xantos XS) operando a 193 nm com frequência de 250 Hz, 1,5 mJ de energia/pulso e íris com abertura de 4mm sobre uma mesa ótica antivibração. O arranjo experimental para gravação das redes de Bragg é apresentado na Figura 3.1 e na Figura 3.2.



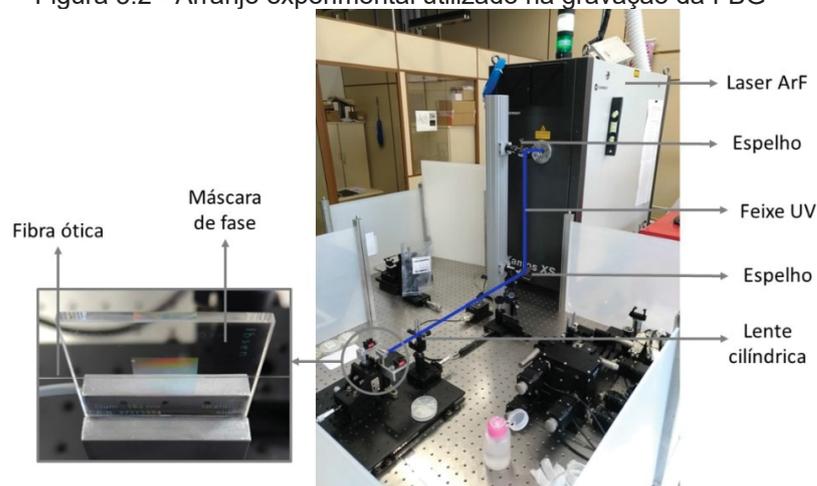
Fonte: Autoria própria

Nota-se, na Figura 3.1, que a lente cilíndrica é posicionada de forma com que o ponto focal esteja alguns micrômetros após a máscara de fase, onde a fibra ótica será posicionada.

Isto se faz necessário para otimizar a interação do feixe UV com o núcleo da fibra ótica. Qualquer desalinhamento neste arranjo pode impedir a correta inscrição da rede de Bragg no interior da fibra ótica. Durante o alinhamento ótico é necessário garantir a perpendicularidade do feixe, o alinhamento das reflexões das lentes com o feixe incidente e o ponto focal da lente cilíndrica sobre o núcleo da fibra.

Durante a gravação, o trecho da fibra ótica que foi exposta ao laser teve sua camada de acrilato removida (cerca de 10 mm de extensão) para permitir a penetração do UV na fibra, e evitar o contato do acrilato com o trecho holográfico da máscara de fase (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Arranjo experimental utilizado na gravação da FBG



Fonte: Autoria própria

Antes de realizar a gravação, o trecho de fibra ótica foi previamente conectorizado por meio da clivagem (corte perpendicular ao eixo da fibra) com clivador (HOEA, modelo 1300) e fusão em sua extremidade com um cabo com conector FC/PC. Para as fibras hidrogenadas foi necessário realizar o aquecimento da extremidade da fibra para remoção do gás, evitando, assim, a formação de bolhas durante o processo de emenda por arco de fusão. Na Figura 3.3(a) é possível observar a tela da máquina de emendas (Splicer Fujikura, FSM-50S) durante o alinhamento dos núcleos da fibra, e na Figura 3.3(b) os eletrodos utilizados na fusão da fibra ótica com o cabo.

O equipamento observado na Figura 3.3 faz a estimativa da perda de intensidade de sinal devido à emenda (que deve ser inferior à 0,05 dB), e também realiza um ensaio de tração na fibra, de forma que a mesma suporte uma carga de pelo menos 2 N. Após este processo a região da emenda é protegida com tubo termo retrátil reforçado com haste metálica.

Figura 3.3 - Emenda de uma fibra ótica: (a) alinhamento do núcleo da fibra e (b) fusão por arco voltaico

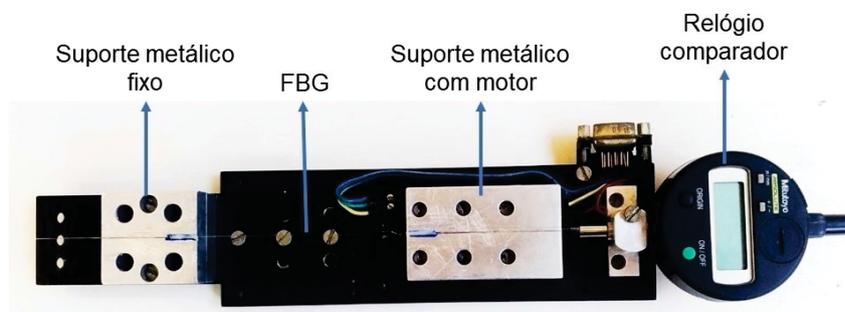


Fonte: Autoria própria

Durante o processo de gravação, o espectro de reflexão foi monitorado com o uso de interrogador ótico (Microoptics, modelo SM-125). A partir dos testes realizados com as fibras, que serão discutidos no item 3.3.1, optou-se por trabalhar com a fibra padrão G652 hidrogenada, devido ao tempo reduzido de gravação, baixo custo de aquisição e alta intensidade da rede de Bragg após a gravação. Para comparar o espectro da FBG obtido após a gravação com o modelo teórico que descreve a reflexão de uma FBG, foi utilizado o aplicativo *Grating Design Software* (da empresa SOL Photonics) para simular espectros com os mesmos parâmetros utilizados na gravação. São aplicadas as equações de Maxwell, a teoria de propagação em guias de onda e o método da matriz de transferência para solucionar as equações diferenciais (NACARATTI; SAMAD; MOTTA, 2021).

Após o processo de gravação da FBG, a mesma foi calibrada em função de sua resposta à deformação específica. Para isso foi utilizado relógio comparador digital (Mitutoyo, S1012M) acoplado a um servomotor, como pode ser observado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Sistema de calibração de deformação específica para sensores FBG



Fonte: Autoria própria

As fibras foram fixadas nas extremidades metálicas do aparato utilizando cola de cianoacrilato, com período de secagem de 24 horas. Para a fixação da fibra sobre o suporte metálico, o acrilato que reveste a fibra foi removido para garantir a aderência na superfície do aparato. Para a calibração foram realizadas 10 medidas de comprimento de onda para cada deformação da fibra em três ciclos de estiramento. As medidas também foram realizadas com o auxílio de um interrogador óptico (Microoptics, modelo SM-125) que pode ser observado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Interrogador óptico utilizado na calibração



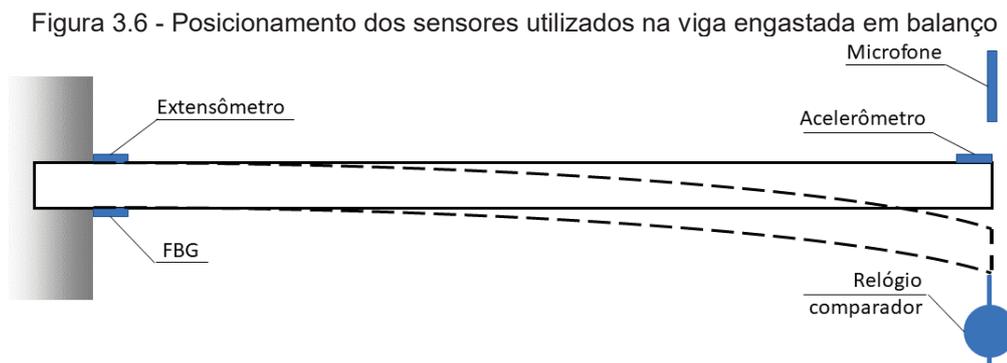
Fonte: Autoria própria

O interrogador óptico é essencial no processo de calibração dos sensores pois permite a avaliação do espectro refletido pela rede de Bragg no núcleo da fibra ótica e o acompanhamento temporal de variações no comprimento de onda do pico refletido.

3.2.3 Instrumentação e cálculos

Com o objetivo de se determinar o módulo de elasticidade estático e dinâmico das barras de argamassas, diferentes sensores e técnicas foram empregadas. Optou-se por utilizar vigas de argamassa pelo material apresentar homogeneidade superior ao concreto (devido à ausência de agregados graúdos) e permitir a realização dos ensaios em amostras reduzidas. Para isso, aos 28 dias, as barras foram engastadas em uma das extremidades de forma a permitir comprimento de 250 mm em balanço. Esta condição de contorno foi adotada por permitir a realização do ensaio utilizando todas as técnicas e, por consequência, reproduzir resultados equivalentes. Nesta condição, maiores valores de deslocamento e deformação específica e menores valores de frequência são obtidos, garantindo uma maior precisão nas

leituras realizadas. Na Figura 3.6 é possível observar o posicionamento de todos os sensores utilizados na viga de argamassa, sendo que cada sensor foi utilizado separadamente. Para os ensaios estáticos, foram realizados cinco carregamentos consecutivos na amostra (1, 2, 3, 4 e 5 kg), e para cada uma das barras os ensaios foram repetidos 3 vezes.



Fonte: Autoria própria

Na extremidade inferior do balanço da viga foi fixado relógio comparador digital (Mitutoyo, S1012M) com precisão de 0,01 μm , posicionado com auxílio de haste magnética. A partir da leitura do deslocamento da viga (δ) no relógio comparador foi possível a determinação do módulo estático (E) pela equação da linha elástica de Euler-Bernoulli (NASH; POTTER, 2014). Na Equação 3.1, P é a carga, L o comprimento em balanço e I o momento de inércia da seção da viga. O peso próprio da viga foi desconsiderado.

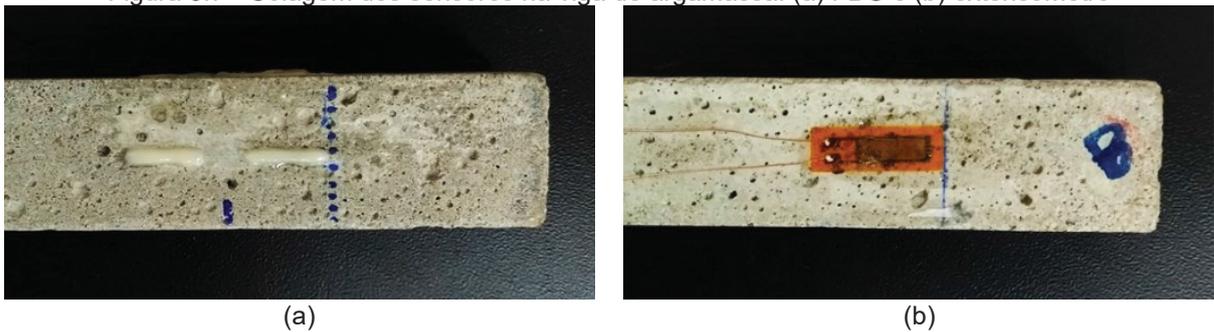
$$E = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot \delta \cdot I} \quad 3.1$$

Próximo ao engaste da viga foram fixados o extensômetro e a FBG na face superior e inferior, respectivamente (Figura 3.7). Para o correto funcionamento do sensor FBG faz-se necessário que o mesmo seja fixado de forma levemente tracionada, permitindo medidas de tração e compressão na amostra. Para isso foi necessário inicialmente remover a camada de acrilato da região da fibra ótica para garantir a aderência entre a casca da fibra e a resina utilizada. Em um dos lados do sensor foi depositada resina fotopolimerizável (Opallis Flow, FMG) composta por monômeros metacrílicos e sua cura foi feita com a utilização de cabine de luz UV (Figura 3.8) por 40 segundos.

Na sequência, a outra extremidade da fibra foi tracionada manualmente (gerando deslocamentos na ordem de 2 nm no espectro refletido) e a extremidade oposta do sensor foi

fixada pelo mesmo método. A aquisição dos dados da FBG (avaliação do espectro do sinal refletido) foi realizada por meio de um interrogador ótico (Microoptics, modelo SM-130). Para o ensaio foi utilizada uma frequência de amostragem de 1 kHz. Uma imagem do sensor fixado pode ser observada na Figura 3.7(a).

Figura 3.7 - Colagem dos sensores na viga de argamassa: (a) FBG e (b) extensômetro



Fonte: Autoria própria

Figura 3.8 - Exposição à luz UV para cura do polímero



Fonte: Autoria própria

O extensômetro de grade linear (Ômega, modelo SGD-10/120-LY11), resistência de 120 Ω e grade de 10 mm foi fixado utilizando cola de cianoacrilato em toda a sua superfície (Figura 3.7(b)), com tempo de secagem de 24 horas. A aquisição do sinal foi realizada utilizando aquisitor de dados (Lynx, modelo ADS2000) com frequência de amostragem de 1 kHz, que utilizou um circuito em um quarto de ponte para o balanceamento do sinal.

A partir dos valores de deformação específica obtidos pela FBG e pelo extensômetro, foi possível o cálculo do módulo elástico estático equivalente (E), realizado a substituição da equação geral da tensão na flexão na equação da lei de Hooke. Desta forma, obteve-se a Equação 3.2, que também foi utilizada para a estimativa da deformação específica equivalente ao deslocamento vertical registrado pelo relógio comparador.

$$E = \frac{6 \cdot P \cdot L}{b \cdot h^2 \cdot \varepsilon} \quad 3.2$$

Na equação 3.2, P é a carga aplicada, L o comprimento em balanço até o sensor, b a base da seção, h a altura da seção e ε a deformação específica próxima ao engaste, obtida pela FBG ou pelo extensômetro. Tendo em vista que a leitura da deformação específica é realizada alguns milímetros do ponto de engaste, estas foram corrigidas por semelhança de triângulo para a posição do engaste.

Para o cálculo dos módulos dinâmicos, além do extensômetro e da FBG, também foi utilizado acelerômetro com capacidade de até 5 gravidades (Kyowa, AS-5GB), conectado ao aquisitor de dados em circuito de ponte completa (Lynx, modelo ADS2000).

No ensaio dinâmico, foi realizada a excitação da barra por meio de uma leve batida na extremidade da viga utilizando barra metálica de 200 g, conforme preconiza ASTM E1875 (ASTM, 2008a), permitindo que a barra entrasse em vibração amortecida, com a aquisição temporal do sinal. Vale destacar que a intensidade da excitação não interfere na frequência de vibração, no amortecimento do material e no módulo elástico calculado. Para cada uma das barras os ensaios foram repetidos 3 vezes.

Após a aquisição foi realizada a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, ou FFT), que converte o sinal do seu domínio do tempo para uma representação no domínio da frequência, permitindo a obtenção da frequência natural de vibração do material.

Utilizando a equação 3.3, para vigas engastadas com peso próprio (ROARK; YOUNG; BUDYNAS, 2002), foi possível realizar o cálculo do módulo elástico dinâmico considerando o primeiro modo vibracional longitudinal. Na equação, E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, f_n é a frequência natural de vibração, k_n é a constante do modo vibracional (Tabela 3.2), L a distância do balanço, I o momento de inércia e M a massa por metro ou massa linear da viga, estimada pela densidade do material de $2,12 \text{ kg/m}^3$, determinada experimentalmente pela NBR 9778 (ABNT, 2005).

$$E_d = \frac{M}{I} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot L^2}{k_n} \right)^2 \quad 3.3$$

Tabela 3.2 - Constantes para os modos vibracionais longitudinais em viga engastada

Modo (n)	k_n
1	3,5160
2	22,0346
3	61,6963
4	120,9010
5	199,8604

Fonte: Roark, Young e Budynas (2002)

O ensaio dinâmico também foi realizado no aparelho SONELASTIC (Marca ATCP), seguindo as prescrições da ASTM E1876 (ASTM, 2015c) e da ASTM C215 (ASTM, 2014a). No ensaio, a barra permanece engastada enquanto um captador acústico direcional (Microfone CA-DP) é utilizado na extremidade de forma a captar a resposta acústica da batida, também na extremidade da viga.

Para este ensaio é realizada a aquisição da intensidade de uma onda mecânica que transita pelo sólido, e o cálculo do módulo dinâmico segue as Equações 3.4 e 3.5, descritas pela ASTM E1876 (ASTM, 2015c). Nas equações, E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, m a massa da barra, f_1 a frequência natural de vibração no primeiro modo de vibração, b a base da seção, L o comprimento do vão, h a altura da seção, T_1 o fator de correção para a geometria prismática e ν o coeficiente de Poisson. Neste trabalho, o coeficiente de Poisson (ν) foi considerado como 0,2, conforme sugerido pela ACI 228 (ACI, 2013) e pela NBR NM 58 (ABNT, 1996b) quando esta propriedade é desconhecida.

$$E_d = 0,9465 \cdot \left(\frac{m \cdot f_1^2}{b} \right) \cdot \left(\frac{L^3}{h^3} \right) \cdot T_1 \quad 3.4$$

$$T_1 = 1 + 6,585 \cdot (1 + 0,075 \cdot \nu + 0,812 \cdot \nu^2) \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 - 0,868 \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^4 - \left(\frac{8,340 \cdot (1 + 0,202 \cdot \nu + 2,173 \cdot \nu^2) \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^4}{1 + 6,338 \cdot (1 + 0,142 \cdot \nu + 1,536 \cdot \nu^2) \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2} \right) \quad 3.5$$

O módulo elástico dinâmico das barras também foi obtido analisando o tempo que uma onda ultrassônica leva para atravessar a amostra, conforme ASTM C597 (ASTM, 2009). Nas extremidades longitudinais dos prismas de argamassa foi aplicado gel de ultrassom para garantir um melhor contato entre os transdutores de 250 kHz do aparelho (Proceq, Pundit Lab) e a superfície da argamassa. Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico da

argamassa, foi utilizada a Equação 3.6 da ASTM C597 (ASTM, 2009) e NBR NM 58 (ABNT, 1996b)

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{(1 - \nu)} \quad 3.6$$

Na Equação 3.6, E_d é o módulo de elasticidade dinâmico, V é a velocidade da onda, ρ é a massa específica do material determinada experimentalmente e ν é o coeficiente de Poisson (também considerado como 0,2).

Em posse das séries temporais de vibração amortecidas obtidas por diferentes sensores, foi possível o cálculo do amortecimento da viga. A estimativa do amortecimento (ξ) foi realizada pelo método do decremento logarítmico, conforme Equação 3.7 (COSSOLINO; PEREIRA, 2010).

$$\xi = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \quad 3.7$$

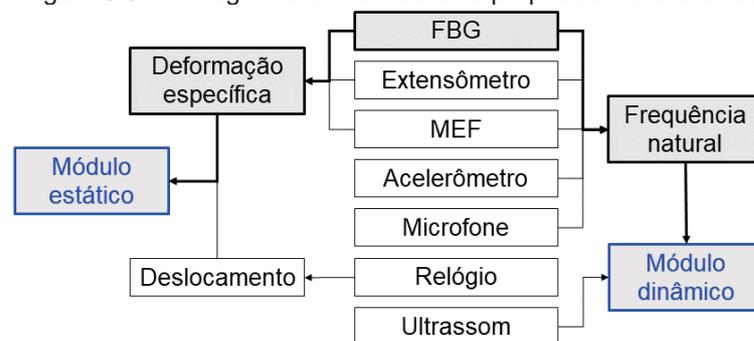
Na equação, A_0 representa a amplitude inicial e A_n a amplitude após n oscilações, conforme será apresentado na Figura 3.25a. Para o cálculo, foi realizada leitura sempre da crista na décima oscilação da onda amortecida. Isso porque a partir deste ponto os dados apresentaram a estabilização do parâmetro, como será discutido nos resultados da Figura 3.25b.

Por fim, foi realizada a modelagem numérica da viga para determinação da deformação específica próxima ao apoio e da frequência natural de vibração via métodos dos elementos finitos (MEF) utilizando o software SAP2000. Para isso, foi realizada análise elástico linear no estado plano de tensões (*plane stress*) utilizando um elemento de membrana discretizado em uma malha com dimensões de 5 mm (totalizando 306 nós no elemento). Para a análise, a densidade do material de 2,12 kg/m³ foi determinada experimentalmente pela NBR 9778 (ABNT, 2005). O coeficiente de Poisson foi adotado como 0,2 e o módulo elástico foi estimado conforme prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2014) pela Equação 3.8, na qual f_{ck} é a resistência característica do concreto aos 28 dias e α_E o parâmetro em função da natureza do agregado (adotado como 1,0 neste trabalho).

$$E = \alpha_E \cdot 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad 3.8$$

Ainda que existam diversos modelos para a estimativa do módulo de elasticidade (DIÓGENES et al., 2011), optou-se pela utilização da normativa uma vez que é a forma normalmente adotada para o cálculo estrutural. A partir da simulação numérica foi possível a estimativa da deformação específica próxima ao engaste, deslocamento vertical da extremidade da viga e frequência natural de vibração. A Figura 3.9 apresenta fluxograma que resume os ensaios realizados e os parâmetros obtidos para o cálculo dos módulos de elasticidade estático e dinâmico na viga de argamassa, com destaque na cor **cinza** para os ensaios realizados utilizando o sensor FBG.

Figura 3.9 - Fluxograma dos sensores e propriedades avaliadas



Fonte: Autoria própria

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

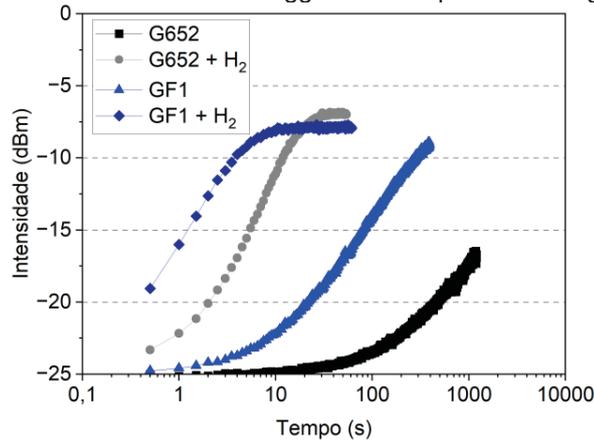
3.3.1 Gravação do sensor FBG em fibras óticas SSFM

Para a fabricação de sensores com rede de Bragg em fibras óticas (FBGs), foram avaliadas duas possibilidades: a primeira foi a utilização de fibras óticas padrão (G652), que tipicamente possuem aproximadamente 3% de GeO₂ na composição do núcleo para gerar variação no índice de refração; a segunda foi a utilização de fibras fotossensíveis (GF1), que possuem dopagem mais elevada de germânio em sua composição ou uso de co-dopantes como o Boro (SILVA, 2005), facilitando as alterações geradas pela exposição à radiação UV.

Também foi avaliada a influência do processo de hidrogenação das fibras no tempo de gravação e intensidade das redes de Bragg geradas durante o processo. Este processo

permite a gravação de redes de Bragg com menores potências óticas e menor tempo de exposição luminosa; e as fibras permanecem fotossensíveis enquanto o hidrogênio estiver presente. As variações das intensidades das FBGs durante o processo de gravação podem ser observadas na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Variação da intensidade da rede de Bragg durante o processo de gravação em diferentes fibras

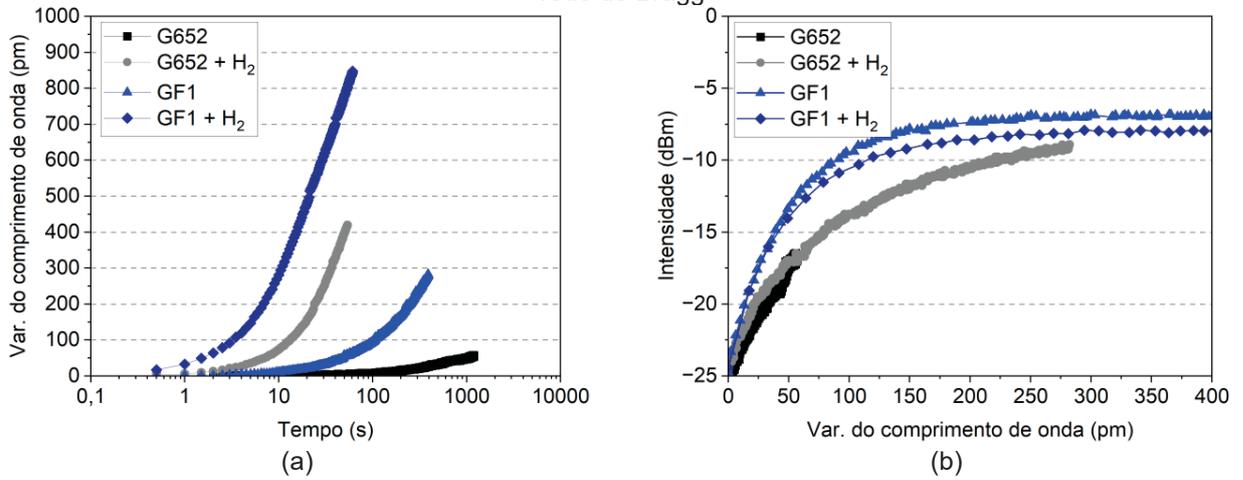


Fonte: Autoria própria

A partir dos dados, é possível verificar que a fibra padrão (G652) levou mais de 15 minutos para atingir intensidades próximas de -15 dBm, sem indicação de estabilização. A fibra fotossensível (GF1) apresentou tempo de gravação reduzida quando comparada à fibra padrão, gerando uma rede de Bragg com intensidade acima de -10dBm, demonstrando maior capacidade de alteração do índice de refração. Após o processo de hidrogenação (+ H₂) ambas passaram a apresentar um tempo de gravação inferior a 30 segundos, com estabilização da intensidade do pico refletido pela rede e saturação (alargamento do pico sem aumento da intensidade). Durante o processo de gravação nas fibras, também foi observada a variação do comprimento de onda, conforme ilustrado na Figura 3.11.

A variação no comprimento de onda observada na Figura 3.11a está relacionada ao aumento do índice de refração efetivo devido à incidência da radiação UV de alta potência, somada à entalpia da reação de quebras dos dopantes com as ligações de silício, indicando que o processo de gravação sofreu influência do tipo de fibra e do processo de hidrogenação. Enquanto o aumento da intensidade, como pode ser confirmado na Figura 3.11b, indica uma maior capacidade de alteração microestrutural nas fibras GF1.

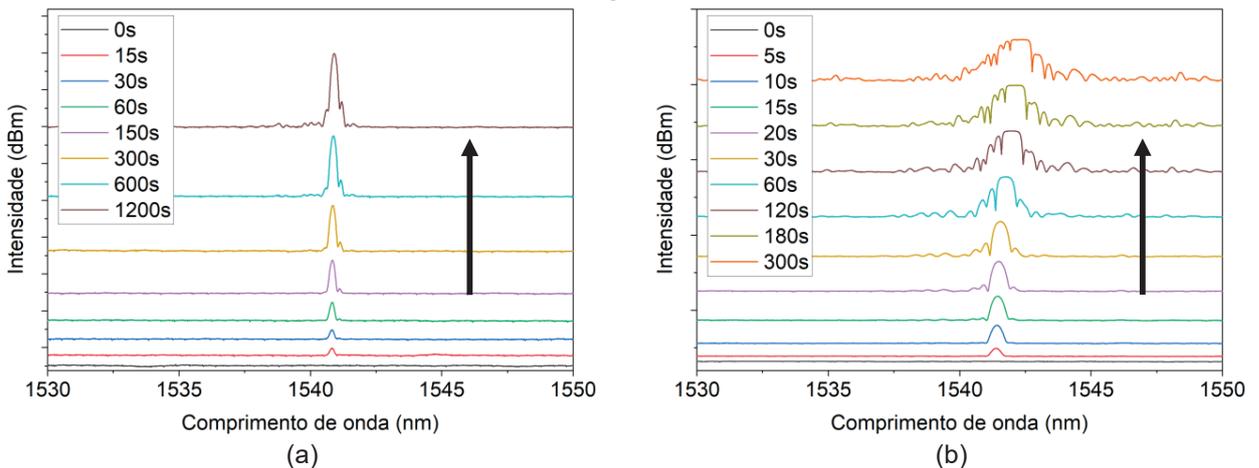
Figura 3.11 - Variação do comprimento de onda em função do (a) tempo de gravação e (b) da intensidade da rede de Bragg



Fonte: Autoria própria

Tendo isto em vista, optou-se por trabalhar com a fibra padrão hidrogenada (G652 + H₂), devido ao seu custo reduzido em 2023 (R\$0,50/m) quando comparada à fotossensível (R\$42,50/m), e por possibilitar a fabricação de redes de Bragg com intensidade e tempo de gravação com melhor desempenho que a fibra fotossensível sem tratamento. O espectro refletido da fibra padrão, com e sem hidrogênio, durante o processo de gravação pode ser observado na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Espectro refletido da rede de Bragg durante gravação com fibras (a) padrão e (b) padrão hidrogenadas



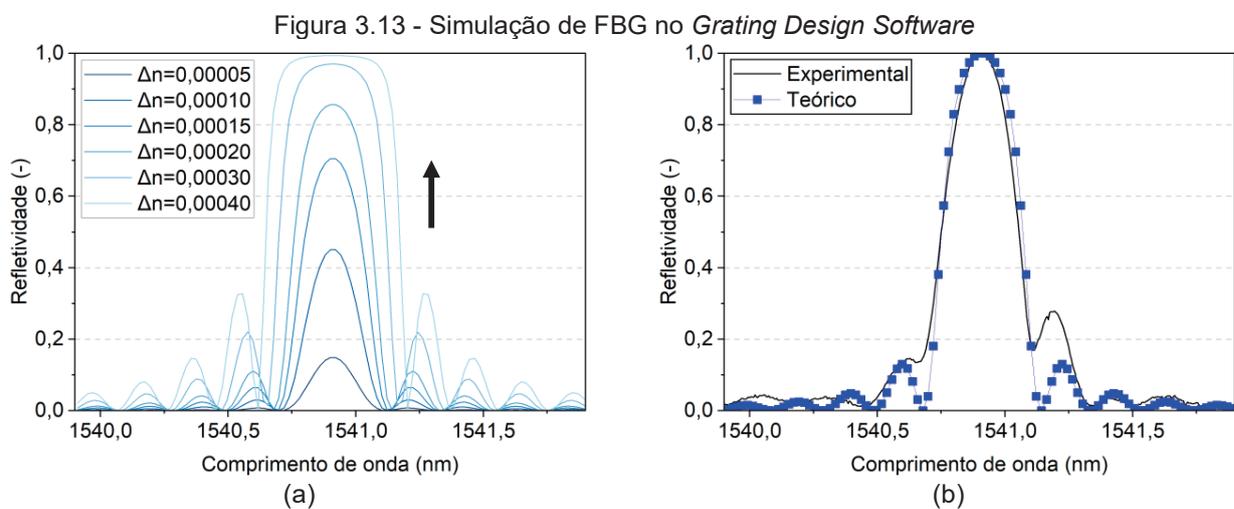
Fonte: Autoria própria

Foi necessária atenção durante o processo de gravação das redes hidrogenadas, uma vez que as fibras apresentavam saturação após atingirem a intensidade máxima, passando a gerar lóbulos laterais e alargamento do topo do espectro do sinal refletido, como pode ser

observado na Figura 3.12b. Redes em fibra não hidrogenadas levariam horas para passar a apresentar este comportamento já conhecido (OLIVEIRA, 2012).

Este efeito de saturação dificulta a detecção do comprimento de onda de pico do espectro refletido pela rede de Bragg, uma vez que os lóbulos laterais podem ser confundidos com o pico principal pelo sistema de aquisição de sinais, e o alargamento do pico aumenta a incerteza do sensor que tem a informação da grandeza medida através da precisa detecção do valor de pico. Assim, padronizou-se o tempo de gravação em 20s, de forma a garantir alta intensidade da rede de Bragg e a presença de pico estreito e bem definido no espectro refletido.

A partir das simulações realizadas no aplicativo *Grating Design Software*. Considerando o índice de refração efetivo (n_{ef}) de 1,447, comprimento da FBG de 4 mm e espaçamento da máscara de fase (Λ) de 1064,9 nm, variou-se a modulação do índice de refração (Δn) de 0,00005 a 0,00040. Os resultados da simulação podem ser observados na Figura 3.13a.

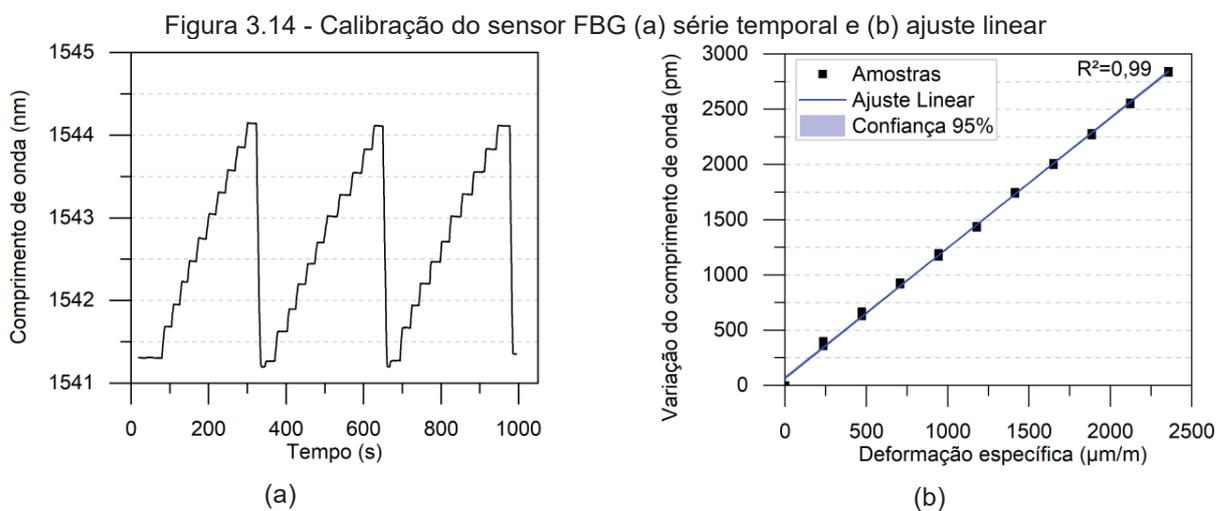


Fonte: Autoria própria

Assim, pode-se comprovar que o aumento da intensidade da rede de Bragg e efeito de saturação (alargamento do pico) ocorrem devido à alteração do índice de refração efetivo causado pela interação do núcleo da fibra ótica com o LASER (Δn). A partir das simulações realizadas, é possível observar também que o espectro refletido teórico apresenta comportamento semelhante ao espectro experimental obtido durante a fabricação dos sensores FBG (Figura 3.13b).

3.3.2 Calibração do sensor FBG

Durante a calibração da FBG, a fibra ótica foi tracionada em um sistema de calibração (Figura 3.4) e a deformação específica foi monitorada por um relógio comparador. Na Figura 3.14 é possível observar os ciclos de carregamentos realizados no sensor, bem como verificar o deslocamento do sinal refletido em função do tracionamento da fibra durante a calibração e os erros do ajuste realizado.



Observa-se que durante os ciclos de carregamento não ocorreu histerese (conservação da deformação após descarregamento), bem como não ocorreram variações não lineares do comprimento de onda. Após ajuste, o sensor FBG apresentou uma sensibilidade de $1,2180 \text{ pm}/\mu\text{m/m}$, ou $1,2180 \text{ pm}/\mu\epsilon$, com R^2 de 0,9989. Na Figura 3.14b ainda é apresentado o intervalo de confiança de 95% do ajuste, que se manteve muito próximo a reta obtida. A faixa de deformações específica em estruturas de concreto está entre $-500 \mu\epsilon$ a $+100 \mu\epsilon$ (DU et al., 2019), e Childs et al. (2008) observaram que o rompimento da FBG nua durante instrumentações ocorre apenas em deformações específicas acima de $2500 \mu\epsilon$. Gobbi et al. (2020) explica que em barragens afetadas por RAS, o deslocamento vertical da crista é mais significativo do que horizontal, que costuma ser mais proeminente em estruturas afetadas por ataque interno de sulfatos. Zoilo (2010) verificou que em barragens de gravidade as taxas de expansão do concreto variam entre 30 e $90 \mu\epsilon/\text{ano}$, enquanto com barragens em arco apresentam expansão média de $15 \mu\epsilon/\text{ano}$. Saouma (2021) compilou dados de expansões anuais em barragens afetadas por RAS e verificou valores de expansão médio de $40 \mu\epsilon/\text{ano}$.

Desta forma, pode-se concluir que a FBG apresenta capacidade de leitura de deformações em uma faixa superior a deformação específica normalmente observada em estruturas de concreto.

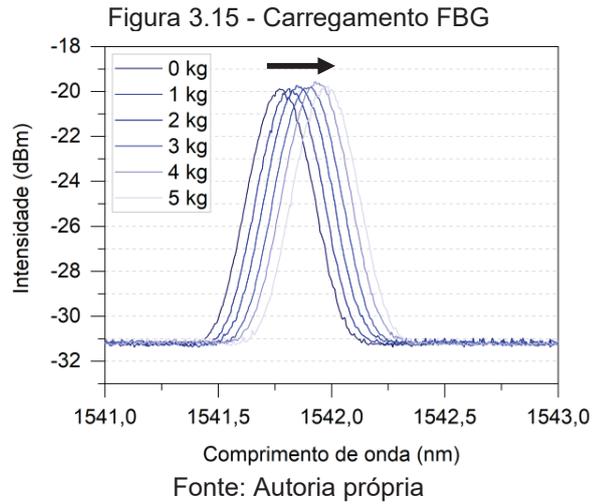
A partir da Equação 2.2, apresentada no capítulo 2 desta tese, é possível estimar qual a calibração teórica do sensor. Portanto, considerando o valor padrão para fibras monomodo para a constante fotoelástica da fibra ($p_e = -0,212$), índice de refração efetivo de (n_{ef}) 1,447 e o espaçamento da máscara de fase (n_{ef}) de 1064,9 nm, o valor teórico da variação do comprimento de onda em função da deformação específica calculado é de 1,2142 pm/ $\mu\epsilon$, valor 0,31% menor que o obtido experimentalmente.

Esta variação é admissível e pode estar relacionada a diferenças nas propriedades fotoelásticas da fibra ou variações no comprimento de onda efetivo da fibra após a gravação. O valor encontrado para a sensibilidade à deformação específica obtida para a FBG encontra-se próximo à valores obtidos ou indicados por outros autores (ALMUBAIED et al., 2017; CHEN; DONG, 2012; CHESTER; MARTELLUCCI; SCHEGGI, 1987; KASHYAP, 2010; LI; SUN; LI, 2010; OTHONOS; KALLI, 1999). Isto posto, o sensor apresentou um comportamento elástico linear com baixa variação (erro médio de 5 pm ou 4,12 $\mu\epsilon$) nas leituras efetuadas, indicando, assim, precisão adequada para medidas de deformações específicas de forma pontual em elementos estruturais.

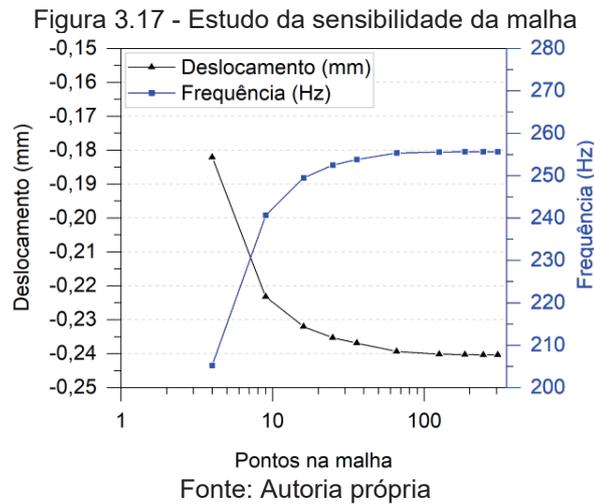
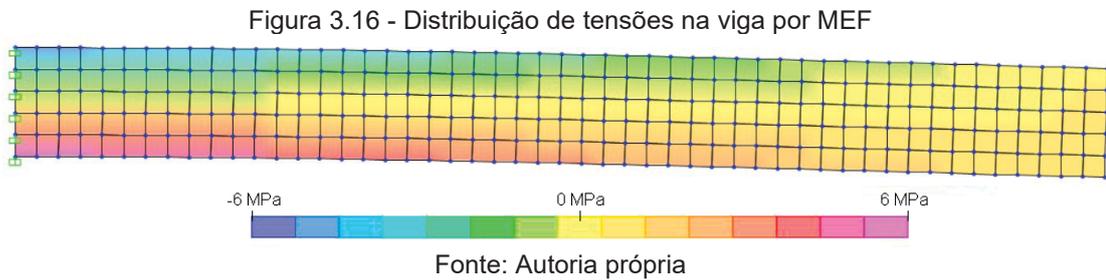
3.3.3 Módulo estático

Para a determinação do módulo de elasticidade estático, as vigas em balanço de argamassas foram carregadas em sua extremidade para que as medidas dos sensores fossem realizadas. Para o ensaio realizado com a FBG, foi possível a identificação do deslocamento do espectro refletido pela fibra ótica em função dos carregamentos, como pode ser observado na Figura 3.15.

Observa-se na Figura 3.15 que o aumento do carregamento acarretou aumento do comprimento de onda, conforme esperado, devido ao afastamento dos períodos da grade da rede de Bragg. Durante o carregamento das vigas não foi observada alteração significativa na forma dos espectros, que apresentaram em média uma largura à meia altura (FWHM) de $0,3205 \pm 0,0012\text{nm}$, e intensidade do pico refletido de $11,702 \pm 0,035\text{dBm}$.



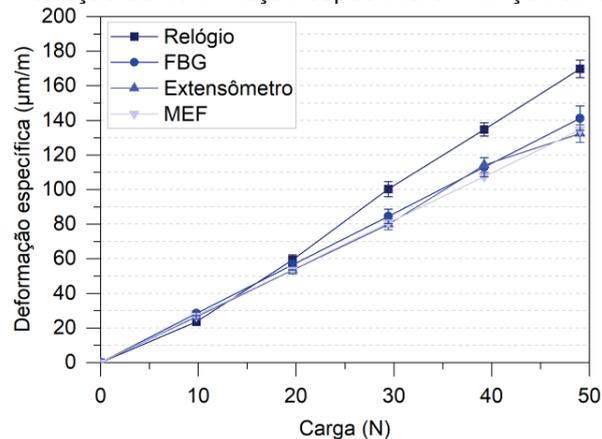
Na simulação numérica realizada por elementos finitos, foi possível verificar a distribuição de tensões ao longo do comprimento da viga (Figura 3.16). Na Figura 3.17 é apresentado o estudo de sensibilidade da malha do modelo numérico, pelo qual se determinou os 306 nós no elemento para que o modelo apresentasse uma resposta adequada.



Na Figura 3.16, observa-se que ocorreu um aumento da concentração de tensões próximas ao apoio da viga, com valores negativos (tração) na face superior, e positivo (compressão) na face inferior de forma simétrica. A partir dos resultados da Figura 3.17, nota-se que a malha utilizada para verificar a distribuição de tensões, frequência de vibração e as deformações da viga foi adequada, uma vez que refinamento da malha até 306 pontos garantiu a estabilização dos resultados obtidos no modelo numérico.

Em posse das medidas obtidas pelo relógio comparador, FBG, extensômetro e simulação por elementos finitos, foi possível comparar os valores das deformações específicas obtidas próximo ao engaste, e os resultados são apresentados na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Variação da deformação específica em função do carregamento



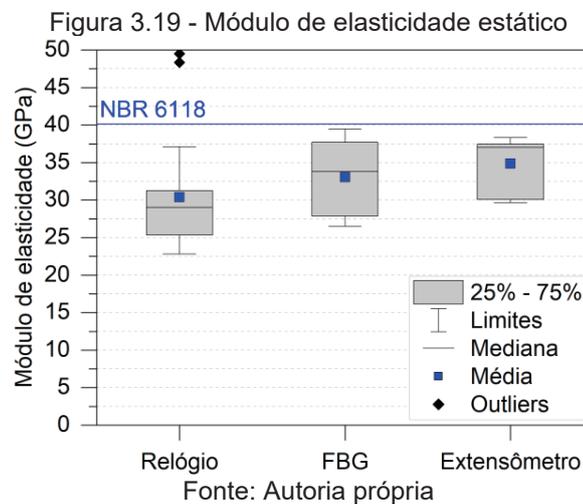
Fonte: Autoria própria

Da análise da Figura 3.18 é possível concluir que durante os carregamentos, apenas as leituras do relógio comparador apresentaram um pequeno desvio quando comparado às demais leituras. Destaca-se que o ensaio realizado com o relógio é a única metodologia que avalia o deslocamento vertical da viga, enquanto as demais realizam a medida da deformação específica propriamente dita. O relógio também é o único sensor que depende do registro manual das leituras. Montija (2007) afirma que leituras com transdutores de deslocamento podem apresentar variações pela dificuldade de se garantir tanto a perpendicularidade da haste medidora em relação ao elemento monitorado, quanto qual parte do relógio sofre deformações durante a realização das leituras.

Após realizar análise de variância (ANOVA), a nível de significância de 0,05, foi possível comprovar que há pelo menos um método apresentando diferenças significativas nos resultados de deformação específica. Para se verificar qual dos métodos apresentava

diferenças significativas com o maior carregamento, foi realizado teste de comparação múltipla de médias pelo método de Tukey a um nível de significância de $\alpha=0,05$. Os resultados das análises estatísticas são apresentados no APÊNDICE A desta tese.

Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as leituras realizadas pelo extensômetro e a FBG, assim como apontado por estudos já realizados (FAJKUS et al., 2018; GLISIC; INAUDI, 2007; RODRIGUES et al., 2010). Em posse dos resultados foi possível o cálculo do módulo elástico estático das barras de argamassa. A comparação dos resultados obtidos é apresentada na Figura 3.19.



Optou-se por representar os resultados em gráfico *boxplot*, visando uma melhor representação da distribuição dos dados. No gráfico apresentado, além da média e mediana dos dados, também são apresentados os pontos fora da distribuição, chamados de *outliers*. No gráfico são representados o segundo e o terceiro quartil da distribuição, que representam 50% dos valores e, portanto, referem-se à um intervalo inferior ao desvio padrão (de 68%). Os limites superiores e inferiores, por sua vez, representam 99% da distribuição dos dados.

Após teste de Tukey ($\alpha=0,05$), primeiramente foi possível constatar que não houve diferenças entre as medidas do módulo elástico obtidos pela FBG e pelo extensômetro. O valor médio de módulo de elasticidade obtido pela FBG e pelo extensômetro foi de 33,03 GPa e 34,87 GPa respectivamente. Já a medida obtida com o relógio comparador foi estatisticamente diferente das obtidas pelos demais métodos, apresentando valor de 30,39 GPa. Assim, é possível afirmar que o sensor em fibra ótica possibilitou a determinação do módulo elástico

com precisão e de forma semelhante ao extensômetro elétrico - método mais utilizado na avaliação de deformações em estruturas.

Não é possível afirmar qual das medidas é a correta, uma vez que todas as técnicas adotadas resultam em um valor aproximado da propriedade avaliada por diferentes princípios físicos, com resultados equivalentes entre si. Assim, é essencial que pesquisadores descrevam detalhadamente o método utilizado em suas pesquisas e levem em consideração as condições de contorno e o tipo de sensor utilizado, informações que muitas vezes não são descritas nos trabalhos.

Destaca-se, por fim, que todas as metodologias resultaram em valores de módulo elástico inferiores ao valor médio estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Esta variação pode ocorrer pelo fato da equação 3.8 ser aplicável a concretos e da geometria avaliada ser esbelta enquanto o modelo foi proposto para avaliação de amostras cilíndricas. Ainda que exista variação nas características dos agregados e do cimento utilizados, foi possível encontrar na literatura trabalhos com o mesmo traço utilizado nesta tese que obtiveram o valor médio de 35 GPa - próximos aos obtidos neste trabalho (GIDRÃO, 2015; MACIOSKI et al., 2014; PENA, 2004).

3.3.4 Módulo dinâmico

Para o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico, as barras de argamassas foram excitadas e o sinal da vibração amortecida foi registrado ao longo do tempo. Este sinal, após processado (transformada rápida de Fourier - FFT), possibilitou a verificação das frequências dominantes, referentes à quantas oscilações a viga sofreu no intervalo de um segundo. Os espectros da vibração amortecida ao longo do tempo e o espectro no domínio de frequência dos ensaios realizados são apresentados na Figura 3.20, Figura 3.21, Figura 3.22 e Figura 3.23.

Destaca-se que pelo ultrassom apenas o módulo elástico pode ser calculado, uma vez que a técnica não possibilita a estimativa da frequência natural e do amortecimento. A frequência obtida em cada ensaio é apresentada em função da amplitude RMS (*root mean square*) - uma medida estatística da magnitude do sensor.

Figura 3.20 - Ensaio de vibração com acelerômetro (a) série temporal e (b) espectro de frequências

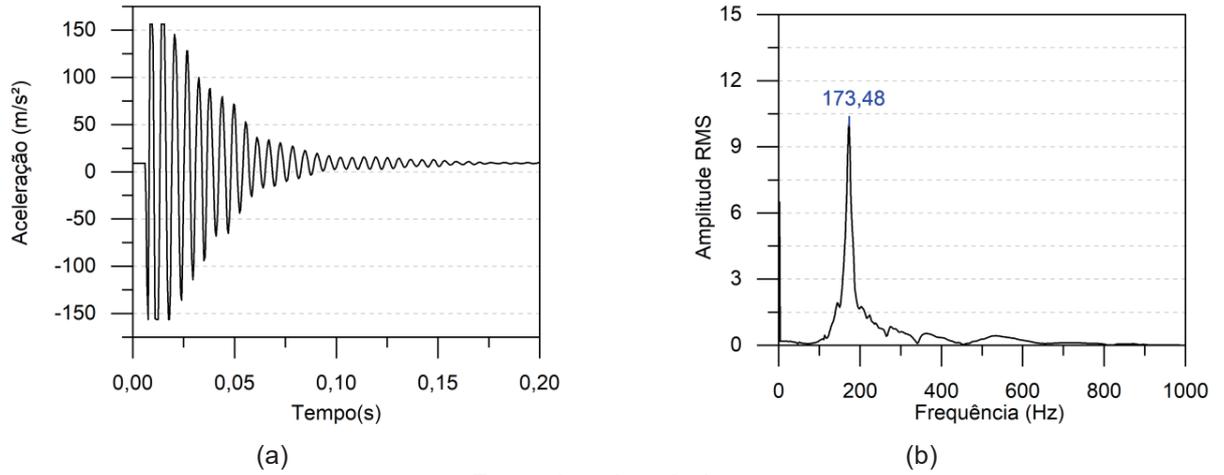


Figura 3.21 - Ensaio de vibração com FBG (a) série temporal e (b) espectro de frequências

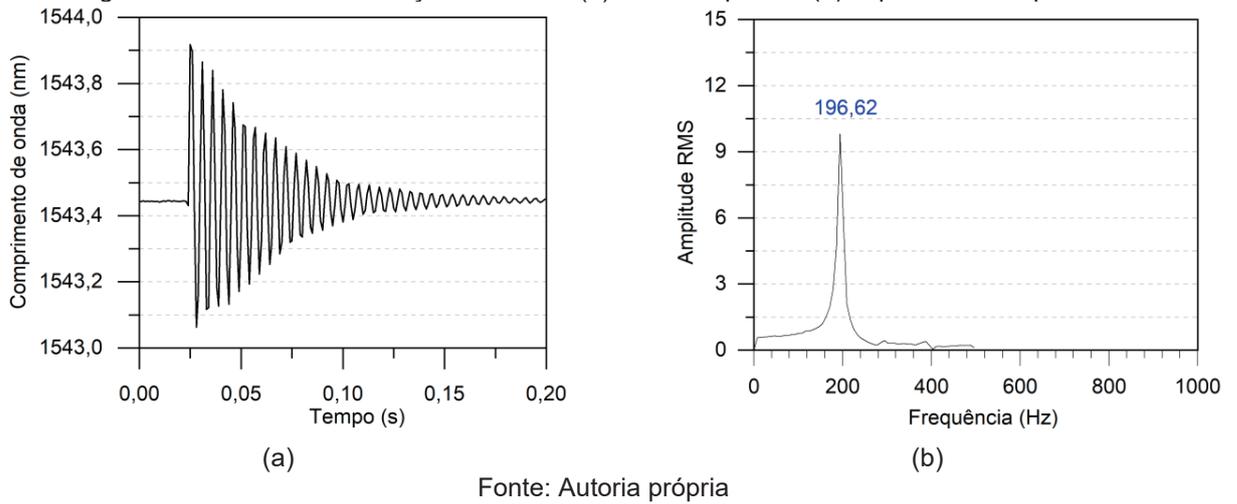
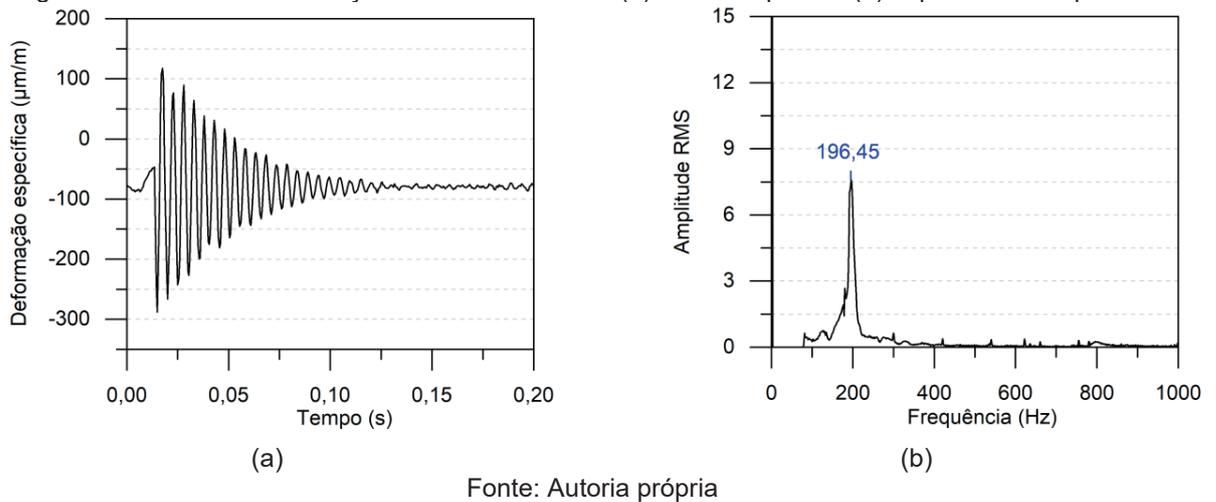
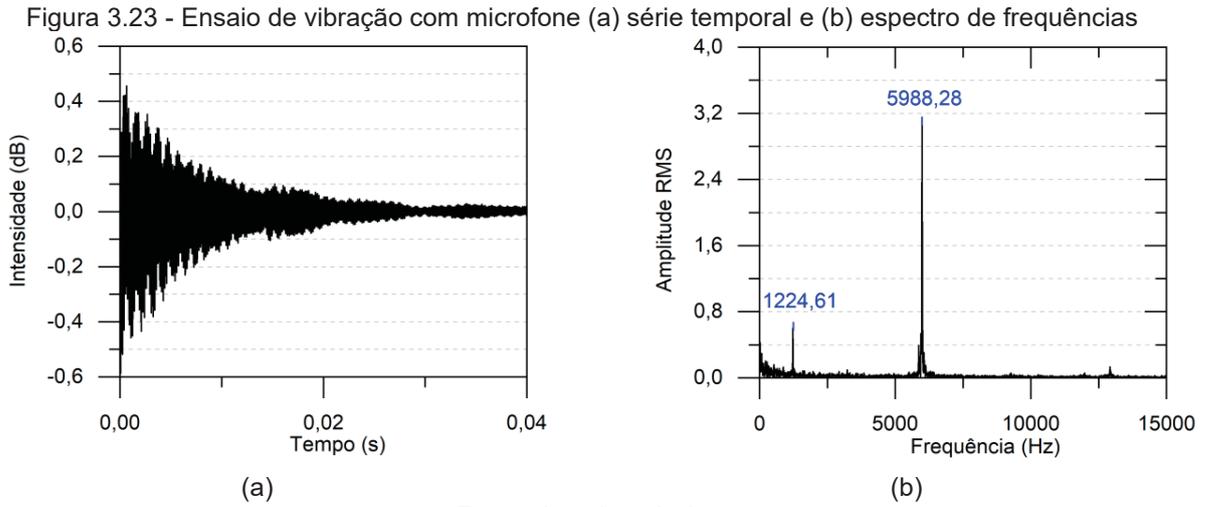


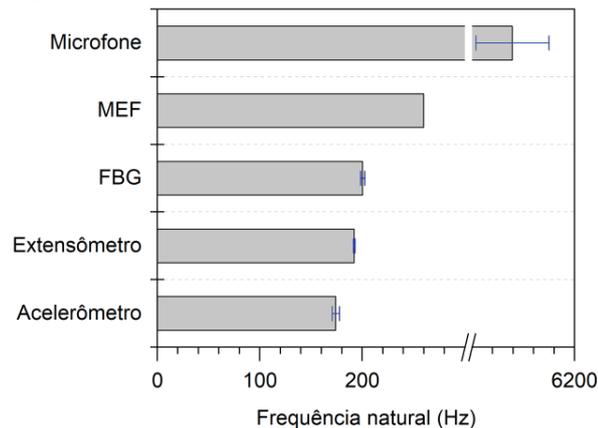
Figura 3.22 - Ensaio de vibração com extensômetro (a) série temporal e (b) espectro de frequências





A partir dos resultados foi possível verificar que todos os sensores permitiram a aquisição da vibração da viga com precisão (baixa dispersão), tendo em vista o amortecimento constante nas séries temporais e o pico definido no domínio de frequências. Nos ensaios realizados com microfone (Figura 3.23) observa-se uma frequência elevada, que ocorre por se tratar de uma onda sonora e não de medidas de deformações durante a vibração como ocorre nos demais ensaios. Na Figura 3.24 são apresentados os valores médios das frequências naturais obtidas nos ensaios.

Figura 3.24 - Frequências naturais de ressonância



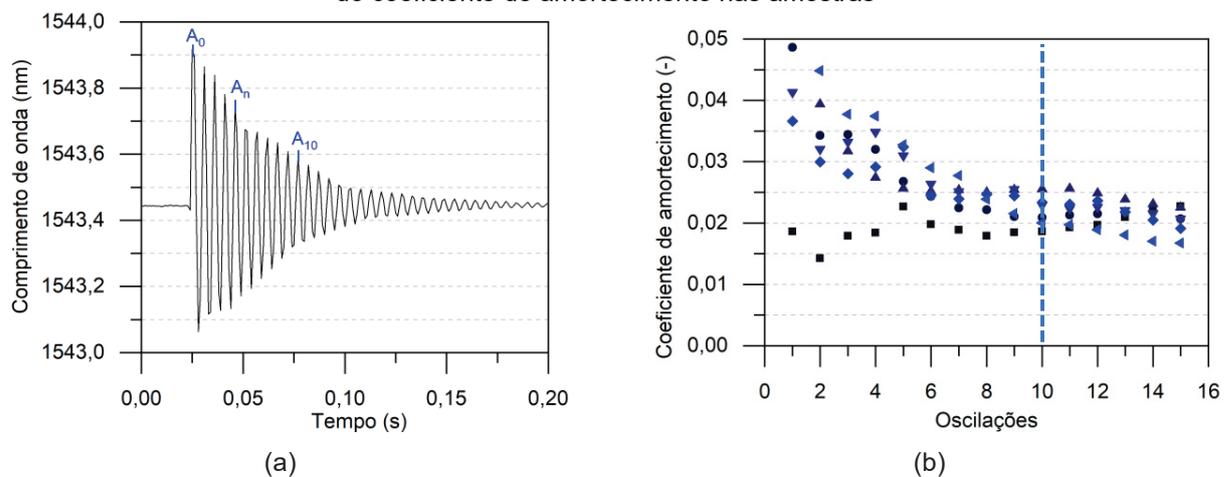
Observa-se na Figura 3.24 que cada sensor apresentou uma frequência natural de vibração média distinta. Na análise estatística foram desconsiderados os resultados obtidos pelo microfone, uma vez que as frequências obtidas estão em outra ordem de grandeza (kHz).

Após teste ANOVA, comprovou-se que existem médias estatisticamente diferentes entre si e, portanto, o método utilizado pode influenciar as frequências obtidas. Observou-se ainda que apenas os métodos FBG e extensômetro não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre si pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$).

Isto posto, é possível afirmar que a frequência teórica estimada via MEF foi a maior entre as técnicas utilizadas, devido à utilização do módulo elástico estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). O resultado obtido pelo acelerômetro foi 33% inferior ao valor teórico estimado via MEF. Já os valores médios obtidos pela FBG e extensômetro foram 25% inferiores ao valor teórico. Como a frequência natural de vibração depende da geometria da peça, não foi possível realizar a comparação dos valores obtidos com outros trabalhos na literatura.

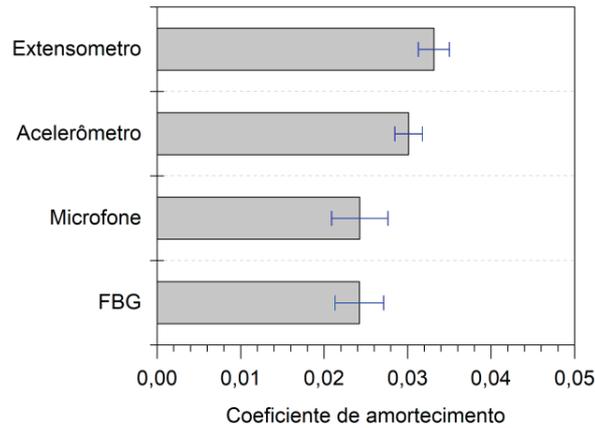
Silva (2005), durante ensaios dinâmicos, também verificou não existir diferenças estatisticamente significativas entre as frequências de vibração em vigas de concreto e de madeira utilizando extensômetro e FBG. O mesmo ocorreu em estudo de Antunes et al. (2012), que comparam leituras de vibração em torre metálica utilizando FBG e sismógrafo e não observaram diferenças significativas. Aplicando o método do decaimento logarítmico, observou-se a estabilização do valor do coeficiente de amortecimento a partir do décimo ciclo de oscilação, conforme apresentado na Figura 3.25. Esse foi o valor utilizado no cálculo conforme Equação 3.7 para os diferentes sensores, e os resultados são apresentados na Figura 3.26.

Figura 3.25 - Pontos utilizados no cálculo do amortecimento: (a) amplitudes da onda amortecida e (b) variação do coeficiente de amortecimento nas amostras



Fonte: Autoria própria

Figura 3.26 - Coeficiente de amortecimento das amostras

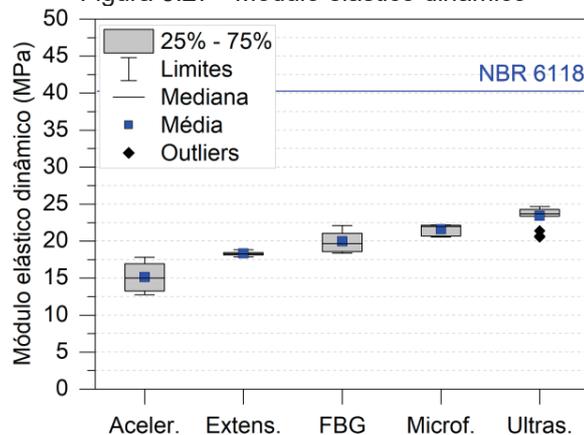


Fonte: Autoria própria

Após teste de Tukey ($\alpha=0,05$), comprovou-se não existir diferenças significativas entre as médias obtidas. Portanto, o tipo de sensor utilizado não influenciou na medida do amortecimento do material, que apresentou um coeficiente de amortecimento médio de 0,0279.

Uma vez que o coeficiente de amortecimento é uma propriedade intrínseca do material, assim como o módulo elástico, e não depende da geometria do elemento estrutural, é possível verificar se o valor obtido é semelhante ao encontrado por outros autores. Em ensaios em argamassas, Gidrão (2015) observou coeficientes de amortecimento entre 0,02 e 0,14 e Swamy e Rigby (1971) entre 0,02 e 0,15, valores que corroboram o encontrado no presente estudo. Após a aquisição e processamento dos sinais, foi realizado o cálculo do módulo elástico dinâmico das vigas. Na Figura 3.27 são apresentados os valores obtidos.

Figura 3.27 - Módulo elástico dinâmico



Fonte: Autoria própria

Analisando os dados apresentados na Figura 3.27, e partir dos resultados de análise estatística (ANOVA) realizada, é possível concluir que a um nível de confiança de 0,05, há pelo menos um método que apresenta diferença significativa entre as médias dos métodos utilizados. Na comparação múltipla de médias pelo método de Tukey ($\alpha=0,05$), não são estatisticamente diferentes apenas os resultados obtidos pela FBG e pelo extensômetro. Esta constatação destaca a exatidão na detecção da frequência natural de vibração e do módulo elástico obtido pela fibra ótica e comprova a viabilidade do seu uso no monitoramento dinâmico de estruturas de concreto.

O módulo elástico dinâmico variou de 15,12 a 23,42 GPa, sendo esses resultados abaixo do valor estimado pela NBR 6118 (ABNT, 2014). Quando comparados os valores de módulo estático e dinâmico obtidos pela FBG, o resultado para o ensaio dinâmico apresentou redução de cerca de 40% na propriedade. Isto pode ter ocorrido pelo fato de que a velocidade do pulso tende a diminuir à medida que o comprimento aumenta devido ao aumento da atenuação dos componentes de maior frequência (IAEA, 2002). Assim, os valores inferiores para o módulo elástico dinâmico podem ser explicados pelo comprimento da amostra, fator que não afetou as medidas estáticas, pois as técnicas utilizadas não foram baseadas na propagação de ondas no interior da amostra. Este comportamento deve ser levado em conta para membros esbeltos ou compridos uma vez que, devido à geometria da amostra, foi possível obter valores baixos do módulo elástico mesmo para o material íntegro. Vale destacar, ainda, que a correlação entre os módulos estáticos e dinâmicos sofrem variação quando a amostra passa a sofrer degradação e fissuração generalizada.

Ainda da análise da Figura 3.27, pode-se observar que o extensômetro apresentou o menor erro nas leituras e o ultrassom foi o único método que apresentou leituras fora do intervalo de confiança de 99%, indicando a presença de dados que não representam o parâmetro de interesse (módulo elástico). Esta alta variabilidade nas leituras no ensaio por ultrassom já foi observada por outros autores (DIÓGENES et al., 2011; FROTTÉ et al., 2017; KARAIKOS et al., 2015). Sabe-se que materiais cimentícios são dispersivos, assim, a velocidade da onda depende diretamente da frequência de onda do ultrassom (ANUGONDA; WIEHN; TURNER, 2001). Desta forma, é esperado que o módulo calculado pelo ultrassom seja superior aos demais métodos devido à alta frequência ressonante do emissor utilizado (250 kHz) e pelo comprimento da amostra (BOHDAN; TOMASZ, 2013).

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no estudo da fabricação de sensores FBG, na avaliação das medidas realizadas por FBG e sensores comerciais, bem como no cálculo do módulo estático e dinâmico das vigas de argamassa utilizando diferentes métodos, é possível concluir que:

- O processo de hidrogenação em câmara permite que fibras óticas monomodo padrão (G652) apresentem o mesmo desempenho que fibras fotossensíveis (GF1), em termos de capacidade da modulação do índice de refração durante o processo de fabricação de sensores FBG. Além disso, o uso de fibras padrão apresenta vantagem econômica, uma vez que possuem um custo atrativo.

- Os resultados experimentais do processo de gravação de sensores FBG apresentaram comportamento semelhante às simulações teóricas realizadas em *software*, o que demonstra que o conhecimento acerca de sensores óticos é consolidado. Os coeficientes de calibração dos sensores obtidos experimentalmente também apresentaram baixa variação quando comparados aos coeficientes calculados teoricamente. Contudo, é essencial que todo sensor seja calibrado individualmente de forma experimental para garantir a confiabilidade das leituras realizadas.

- Observou-se que os métodos e sensores adotados para medir as propriedades dos materiais podem influenciar significativamente nos resultados obtidos. Estas diferenças estão atreladas aos diferentes princípios físicos envolvidos nas técnicas de leitura de cada tipo de sensor. Desta forma, todas as técnicas apresentam uma estimativa aproximada das propriedades avaliadas e apresentam erros associados à essas leituras, os quais devem ser devidamente avaliados antes da adoção de uma técnica de instrumentação.

- Existe um comportamento não linear das leituras obtidas pelo relógio comparador durante a flexão da viga no ensaio estático, que subestimou os valores do módulo elástico do material. A menor precisão do relógio comparador, o registro manual das leituras, além da dificuldade de se garantir o posicionamento do equipamento podem ter influenciado o resultado obtido. Este comportamento reforça a vantagem da utilização de sensores eletrônicos com medidas discretas realizadas em tempo real, eliminando a influência do operador nas leituras realizadas.

- A estimativa do módulo elástico pela NBR 6118 foi superior aos obtidos de forma experimental em ensaios dinâmicos. Cabe ressaltar que o modelo proposto pela normativa é indicado para concretos, e é baseado em ensaios estáticos durante a compressão de amostras cilíndricas. Desta forma, o tipo de técnica utilizada para sua determinação, a alteração da geometria e tipo de material impactam diretamente nos resultados obtidos. Destaca-se que dimensionamento estrutural e provas de carga utilizam resultados de módulo estático, pois são baseadas na lei de Hooke e na capacidade de deformação de sólidos. Já a avaliação de estruturas baseadas em propagação de ondas se ajusta melhor à estimativa do módulo dinâmico do material.

- Parte dos sensores utilizados no estudo permitiram tanto a obtenção de medidas estáticas quanto a realização de ensaios de vibração livre, com obtenção do coeficiente de amortecimento e frequência natural. Este fato demonstra a versatilidade do uso de sensores na instrumentação estrutural, que, quando bem planejados, podem permitir o monitoramento contínuo estático e dinâmico de estruturas utilizando o mesmo arranjo experimental.

- A partir dos resultados obtidos, observou-se que os sensores em fibra ótica com rede de Bragg (FGB) apresentaram resultados sem diferença estatística significativa quando comparados ao extensômetro - sensor mais utilizado na instrumentação de elementos estruturais. Cabe ressaltar ainda que ambos apresentaram baixa dispersão dos dados, alta precisão e fácil aplicação. Os demais sensores e métodos utilizados apresentaram uma maior variação nos resultados e maior dispersão nos dados obtidos.

- Após a calibração experimental, o sensor em fibra ótica apresentou sensibilidade de $1,2180 \text{ nm}/\mu\epsilon$, e permitiu a estimativa de módulo elástico de $23,53 \pm 0,51 \text{ GPa}$ nos ensaios estáticos, e $17,63 \pm 0,23 \text{ GPa}$ (25% inferior) nos ensaios dinâmicos. Durante os ensaios nenhum sensor apresentou comportamento anômalo, falha no registro de dados ou dificuldade de aplicação.

Assim, comprovou-se a eficácia do uso de sensores óticos na avaliação de propriedades mecânicas de materiais de construção. Esses sensores apresentam diversas vantagens como baixa perda de sinal em longas distâncias, não sofrer interferências eletromagnéticas, não necessidade de alimentação de corrente elétrica no sensor e ausência de partes metálicas suscetíveis à oxidação. Essas características tornam o sensor FBG uma alternativa viável na instrumentação de estruturas. Resta comprovada a confiabilidade e precisão da FBG para aplicação no tanto no monitoramento de elementos estruturais quanto

na realização de ensaios em laboratório para a determinação de propriedades de materiais de construção.

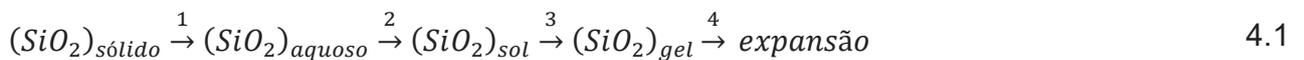
4 APLICAÇÃO DO SENSOR FBG NA AVALIAÇÃO DA RAS

4.1 INTRODUÇÃO

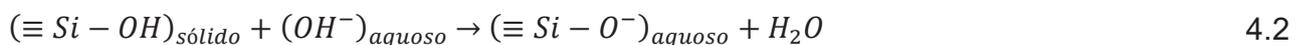
4.1.1 Cinética da reação álcali-sílica (RAS) e fatores influentes

A reação álcali-sílica (RAS) é definida como a reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila (OH^-) associados aos componentes alcalinos sódio (Na^+) e potássio (K^+) - provenientes do cimento Portland ou outras fontes presentes na solução de poros do concreto - com fases minerais contendo sílica (SiO_2) amorfa ou metaestável existentes nos agregados graúdos ou miúdos, que na presença de umidade (H_2O) gera a formação do gel RAS expansivo (FIGUEIRA et al., 2019; FOURNIER; BÉRUBÉ, 2000; KIM; OLEK; JEONG, 2015).

Segundo Rajabipour et al. (2015), a reação ocorre em quatro etapas: (1) dissolução da sílica metaestável, (2) formação do sol⁴ de sílica nano-coloidal, (3) gelificação do sol e (4) expansão do gel, conforme Equação 4.1.



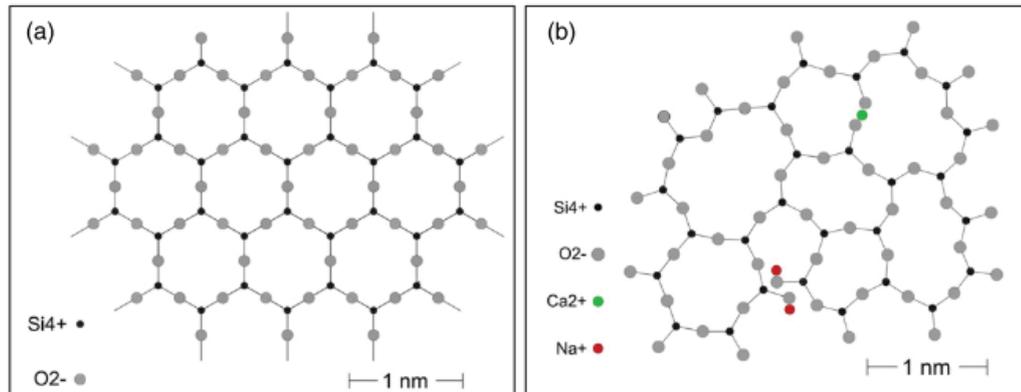
Assim, em um ambiente alcalino ($\text{pH} > 11$), a estrutura do agregado silicoso é dissolvida por íons hidroxila que atacam os grupos silanol ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) presentes na interface sílica-água (Equação 4.2) e os íons OH^- também hidrolisam as ligações de siloxano ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$) (Equação 4.3).



Na Figura 4.1a é possível observar a representação da estrutura cristalina de um quartzo cristalino e na Figura 4.1b é apresentada a mesma estrutura após a quebra parcial das ligações, conforme descrito anteriormente.

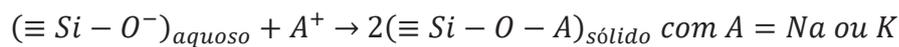
⁴ Sol é uma dispersão de partículas coloidais (dimensão entre 1 e 100nm) em um fluido, enquanto gel é um sistema formado pela estrutura rígida de partículas coloidais (gel coloidal) ou de cadeias poliméricas (gel polimérico) que imobiliza a fase líquida nos seus interstícios (ALFAYA; KUBOTA, 2002)

Figura 4.1 - Representação do (a) quartzo cristalino e (b) quartzo amorfo após dissolução parcial da sílica



Fonte: Rajabipour et al. (2015b)

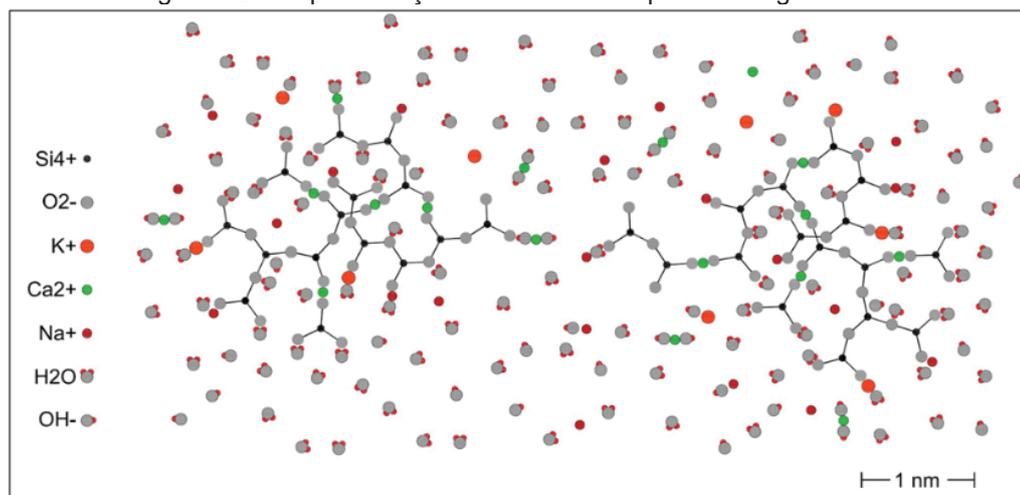
Na sequência, os íons de sódio e potássio fornecidos pelo cimento equilibram as cargas negativas na rede de sílica (Equação 4.4).



4.4

Com isso, ocorre a formação do gel de álcali-sílica composto por um aglomerado de partículas de sílica coloidal rodeada pela solução de poros do gel – na qual a estrutura da sílica está altamente degradada. Este produto pode absorver água, resultando em inchamento, expansão e fissuração do concreto.

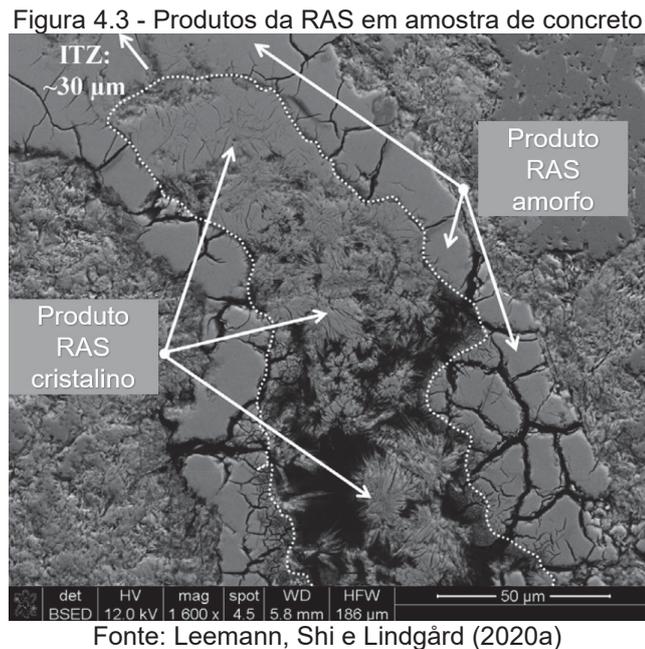
Figura 4.2 - Representação da sílica em suspensão no gel de RAS



Fonte: Rajabipour et al. (2015b)

Apesar de sua nomenclatura na literatura, o gel que preenche os vazios do agregado fissurado é um material rígido com grau de amorfismo variado, solúvel em água e composto

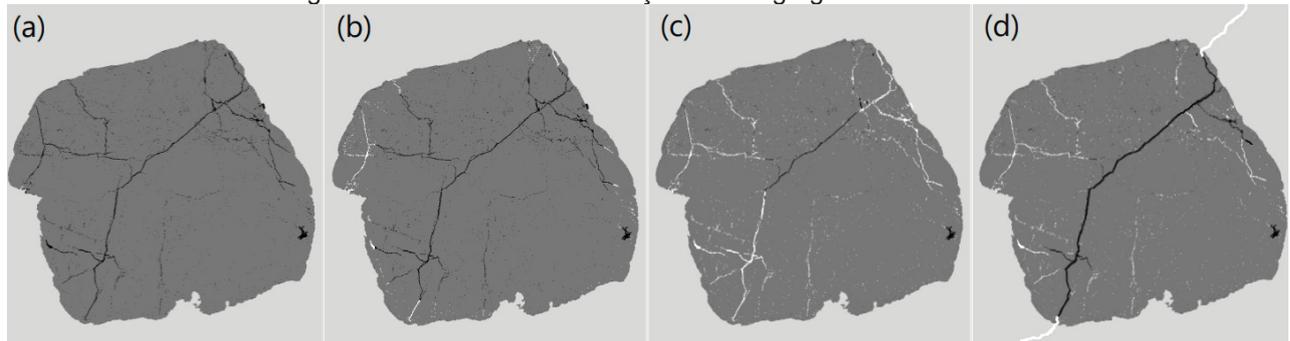
por silicato de potássio e/ou sódio hidratado contendo água livre e quimicamente combinada, podendo ainda conter carbonatos precipitados em seus vazios (HASPARYK, 2022a). Na Figura 4.3, é possível verificar presença de produto cristalino e amorfo de RAS dentro de fissuras no agregado reativo.



Sabe-se que o produto de reação amorfo é o primeiro a se formar na borda e interior dos agregados, gerando fissuração. Em regiões mais afastadas do agregado e na pasta de cimento é comum a formação tardia de produtos cristalinos devido à uma maior concentração de cálcio e menor concentração de álcalis – resultando em uma composição semelhante à do C-S-H. Assim, independente de morfologia cristalina ou amorfa, a composição química do produto da RAS é similar, com relações atômicas Ca/Si e (Na+K)/Si próximas a 0,25 (LEEMANN et al., 2023). Foram propostas na literatura algumas estruturas cristalinas para os produtos da RAS, que podem apresentar cristalografia semelhante aos minerais Shlykovita, Okenita, Mountainita ou Rhodesita (DÄHN et al., 2016). Na presença de umidade estes minerais podem apresentar aumento do espaço interplanar e consequente aumento de volume, próximo à 100% (GALLYAMOV et al., 2022).

Quando a tensão originada pela formação destes produtos RAS excede a resistência à tração dos agregados, são geradas novas fissuras. Estas começam nos agregados, propagam-se para a pasta de cimento e, eventualmente, são preenchidas com novos produtos de reação (LEEMANN et al., 2016). Esse mecanismo encontra-se ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Mecanismo da reação álcali-agregado no concreto



Fonte: Leemann et al. (2023)

Na Figura 4.4 é possível observar uma partícula de agregado (cinza escuro) embebida em pasta de cimento (cinza claro) de um concreto. Na Figura 4.4a a partícula de agregado apresenta microfissuras pré-existent; na Figura 4.4b ocorre precipitação de produtos RAS (branco) nas microfissuras, com início próximo da interface do agregado com a pasta de cimento; na Figura 4.4c a precipitação contínua em direção ao interior da partícula de agregado e na Figura 4.4d ocorre a fissuração do agregado e da pasta de cimento adjacente, com a difusão da solução rica em álcalis na pasta de cimento e a sua precipitação ao longo da fissura.

Assim, os quatro principais requisitos que devem ser satisfeitos simultaneamente para o desenvolvimento da RAS no concreto, são: (i) a existência de agregados contendo sílica reativa; (ii) alta concentração de álcalis ou, mais precisamente, alta concentração de íons OH^- para ataque da sílica; (iii) uma fonte de cálcio solúvel, como a portlandita, para reagir com a sílica dissolvida e formar o gel deletério; e (iv) condições de alta umidade, pois o acesso à umidade permite a dissolução das fases e a expansão do gel (ABDELRAHMAN et al., 2015; FIGUEIRA et al., 2019).

Assim, a RAS é influenciada diretamente pelo teor de álcalis disponível na solução de poros, considerando a contribuição de sódio e potássio, que pode ser expressa em termos de equivalentes de óxido de sódio ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}^5$). Alguns estudos mostram que conteúdos alcalinos entre 0,45% e 0,60% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ já são capazes de induzir o início da reação, enquanto conteúdos alcalinos iguais ou inferiores a 0,40% raramente reagem (BÉRUBÉ et al., 2004). Ensaio experimentais demonstraram que o agregado exposto à solução de NaOH sofre dissolução à uma taxa maior do que o exposto na solução de KOH (KIM; OLEK, 2014), ainda que íons K^+ sejam mais eletronegativos e tenham uma maior afinidade a ligações químicas.

⁵ $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$. Sendo 0,658 a relação molar entre Na_2O e K_2O .

Ademais, vale destacar que a reação costuma ocorrer em umidades relativas superiores à 80% (RAJABIPOUR et al., 2015a).

O cálcio também possui um importante papel na cinética da reação, por participar da troca com os álcalis e influenciar diretamente a morfologia e capacidade de expansão do gel. Altas concentrações de cálcio na solução dos poros impedem a difusão de sílica para longe das partículas de agregados. Se o cálcio não estiver disponível, a sílica reativa dissolve-se sem causar danos. Desta forma, a formação de géis ricos em cálcio é necessária para provocar a expansão. O cálcio aumenta ainda a viscosidade e o limite de elasticidade do gel, resultando em maiores magnitudes de tensão geradas pela sua expansão (RAJABIPOUR et al., 2015b).

Processos de mitigação buscam, portanto: limitar a alcalinidade da solução de poros; evitar o uso de agregados reativos; impedir o ingresso de umidade no sistema e modificar quimicamente o gel RAS para reduzir sua expansão (RILEM, 2016).

Em estruturas novas, as adições minerais reativas (pozolanas) como metacaulim, cinza volante, escória granulada de alto-forno e sílica ativa podem controlar a RAS. Isso se deve ao fato de que o uso de adições minerais reativas reduzirem o teor de cimento Portland na mistura, o que diminui a quantidade de álcalis disponíveis no concreto, reduzindo a concentração de íons Na^+ , K^+ e OH^- na solução de poros e limitando sua disponibilidade para reagir com o agregado reativo (DIAMOND, 1983; SIMS; POOLE, 2017). Além disso, as pozolanas contribuem para o consumo de portlandita e o refinamento de poros devido à formação de C-S-H adicional (HOPPE FILHO, 2008). Sabe-se que a capacidade de mitigação também está relacionada com a relação CaO/SiO_2 das adições, e que a alumina desempenha um papel importante na determinação da capacidade de ligação das adições com os álcalis (FIGUEIRA et al., 2019). As relações atômicas entre os componentes do gel formado, como Na/Si , K/Si e Ca/Si , também influenciam a capacidade de expansão do gel (GHOLIZADEH-VAYGHAN; RAJABIPOUR, 2017a).

No caso de estruturas existentes, as estratégias de mitigação mais utilizadas são o uso de tratamentos de superfícies para fechamento de fissuras e a limitação da presença de umidade na estrutura (LANGARO, 2023). O uso de compostos de lítio, por exemplo, é capaz de mitigar a RAS por terem a capacidade de se combinar antes com a sílica amorfa, formando produtos cristalinos não expansíveis (BÉRUBÉ et al., 2004). A forma indicada para sua aplicação é por meio de impregnação eletroquímica ou vácuo (THOMAS et al., 2007). Figueira et al. (2019) destacam que os tratamentos superficiais devem permitir a saída do vapor de água e que produtos à base de silanos e siloxano têm mostrado maior potencial na mitigação

da RAS. Todavia, os resultados de tratamento de superfície para mitigação da reação ainda são controversos na literatura. O processo de cicatrização do concreto (autógena ou associado ao uso de bactérias e cristalizantes) também é capaz de recuperar as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto danificado devido ao preenchimento de fissuras e refinamento dos poros (MUNHOZ et al., 2021; SOUZA, 2022), ainda que não seja possível verificar evidências de sua ação nas fissuras em agregados (DE SOUZA; SANCHEZ, 2023a).

Como a cinética da RAS depende do grau de cristalinidade, densidade e área específica interna e externa dos agregados (FIGUEIRA et al., 2019), uma investigação mais aprofundada nestes grãos pode ser realizada pelo ensaio de petrografia. O ensaio baseia-se na análise em microscópio de seções delgadas, e deve ser realizada por profissional treinado, conforme indicado pelas normativas RILEM TC 191 (RILEM, 2016), NBR 15577-3 (ABNT, 2018c), ASTM C295 (ASTM, 2008b) e BS 7943 (BIS, 2018). Destaca-se, porém, que as normativas citadas não estabelecem um limite de fases minerais identificadas no ensaio petrográfico a partir do qual o agregado possa ser classificado como reativo, sem exigir ensaios complementares. Países como França, Alemanha e Dinamarca classificam como potencialmente reativos agregados que contenham mais de 2% de minerais contendo sílica amorfa em sua composição (FIGUEIRA et al., 2019).

Segundo a NBR 15577-1 (ABNT, 2018a), a reação álcali-sílica costuma ocorrer em minerais como opalas, cherts, quartzo microcristalino, quartzo deformado, vidro vulcânico e vidros reciclados. Em seu anexo, a NBR 15577-3 (ABNT, 2018c) apresenta a Tabela 4.1, elaborada com base na *Canadian Standards Association A23.1-04* (CSA, 2014a), indicando os principais minerais e rochas suscetíveis à RAS que devem ser identificados durante a análise petrográfica.

Os valores máximos aceitáveis de uma ou mais fases reativas adotados pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018a) para classificar um agregado como potencialmente inócuo são: 5% de quartzo microgranular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de tridimita ou cristobalita, 3% de vidro vulcânico e 0,5% de opala. Acima desses valores os agregados são considerados potencialmente reativos, mas com base em sua experiência e nas demais feições presentes, o petrógrafo pode admitir classificação distinta.

Gao et al. (2013b) não encontraram proporcionalidade direta entre as expansões finais de amostras de concreto e o conteúdo de sílica reativa dos agregados; resultado corroborado pelo estudo de Šachlová (2013), que também verificou que o teor de minerais não pode ser correlacionado com a expansão causada no concreto, uma vez que apenas parte destes

minerais é capaz de induzir a RAS. O autor também concluiu que o aumento da área específica do agregado e a diminuição do diâmetro médio dos grãos gerou maiores expansões, uma vez que há uma maior área disponível para reação.

Tabela 4.1 - Minerais e rochas suscetíveis à RAS

Minerais reativos, com cristalinidade baixa ou sílica metaestável e vidros vulcânicos		
Material reativo	Rochas de ocorrência	
	Rochas sedimentares	Rochas vulcânicas
Opala, tridimita ou cristobalita, vidro vulcânico ácido, intermediário ou básico	Rochas sedimentares contendo opala, como folhelho, arenito, rochas silicificadas, alguns cherts e flints e diatomito	Rochas vulcânicas com vidro ou vitrofíricas: rochas ácidas, intermediárias ou básicas como riólito, dacito, latito, andesito, tufo, perlita, obsidiana e todas as variedades contendo uma matriz vítrea, além de alguns basaltos
Rochas potencialmente reativas contendo quartzo		
Material reativo	Tipos de rocha	
Calcedônia, quartzo micro e criptocristalino. Quartzo macrogranular fraturado, e/ou deformado, podendo conter agregados de quartzo microcristalino no contato do grão (textura <i>mortar</i>)	Chert, veio de quartzo, quartzo arenito, arenito quartzoso, calcário silicioso e calcário com quartzo microgranular disperso. Rochas vulcânicas com vidro devitrificado micro ou criptocristalino. Outras rochas que contenham quartzo deformado, microcristalino ou criptocristalino, tais como: Rochas ígneas: granito, granodiorito e charnockito (desde que apresentem feições e fases indicativas de reatividade). Rochas sedimentares: gravaca, siltito, argilito, folhelho, calcário silicioso e arcóseo. Rochas metamórficas: gnaiss, quartzomica xisto, quartzito, filito, ardósia, rochas miloníticas e cataclásticas	

Fonte: NBR 15577-3 (ABNT, 2018c)

Para Castro, Sorensen e Broekmans (2012) a análise petrográfica não é capaz de avaliar fases minerais cristalinas e amorfas de forma quantitativa. Por este motivo, técnicas complementares à investigação petrográfica são indicadas como: coloração seletiva de minerais, análise por difração de raios X (DRX), análise termodiferencial e termogravimétrica (ATD/ATG), espectroscopia de infravermelho (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise de raios X por energia dispersiva (EDS), entre outras.

Ensaio químicos complexos, como espectroscopia de emissão atômica (ICP-AES) e ressonância magnética nuclear (RMN), já foram realizados com sucesso em outros estudos para quantificar a dissolução da sílica e concentração de íons na solução do poro (BULTEEL et al., 2002; KIM; OLEK, 2014; LEEMANN et al., 2011). Métodos químicos como testes de luminescência utilizando íons urânio (que têm uma fluorescência amarela esverdeada sob luz UV) no concreto para confirmar a presença do gel da RAS (NATESAIYER, 1993), bem como outras técnicas colorimétricas equivalentes (GUTHRIE; CAREY, 1997) não se mostraram eficientes no diagnóstico da reação. Quando associadas a técnicas complementares como DRX, MEV e EDS é possível confirmar a reação, porém, a utilização destas técnicas no

diagnóstico da reatividade de agregados é difícil devido ao seu alto custo associado e dificuldade de execução pela maior parte dos construtores.

Na tentativa de se estabelecer o grau de reatividade de agregados, alguns autores (GAO et al., 2013; ICHIKAWA, 2009; KAWABATA; YAMADA, 2017) observaram que existe relação entre a concentração de hidróxido de uma solução de poros e a reatividade dos agregados para que seja induzida a maior expansão do concreto, para cada tipo de agregado reativo. Entretanto, essa expansão se altera com a mudança da proporção de agregados no concreto – conhecido como efeito péssimo (*pessimum effect*).

Quanto à distribuição granulométrica, o grau de expansão tende a aumentar com a redução do tamanho de partículas. Contudo, Chatterji (2005) demonstrou que a adição de partículas de agregado reativo inferiores a 160 µm não causaram expansão e inferiores à 80 µm são capazes de reduzir a expansão no concreto devido ao efeito de empacotamento (efeito fíler). O efeito escala, por sua vez, indica que a expansão em amostras pequenas e grandes sofre influência direta do tamanho do agregado utilizado. Gao et al. (2013b) observaram que a maior expansão é obtida quando a relação entre a dimensão da amostra e o diâmetro médio dos agregados está próximo a 100. Porém, os autores destacam ser difícil separar o efeito escala e o efeito péssimo em amostras com RAS.

Ainda que avanços significativos tenham sido feitos, a capacidade de compreender, prever e descrever o desenvolvimento da RAS permanece limitada e incompleta (FIGUEIRA et al., 2019), em especial quando ocorrem ataques combinados com sulfatos e gelo-degelo, por exemplo. São poucos os estudos que buscam determinar a reatividade dos agregados de forma dissociada do concreto. Houve a tentativa de se estabelecer testes químicos para classificação da reatividade dos agregados pela normativa ASTM C289 (ASTM, 2007), cancelada em 2016 devido a resultados contraditórios.

Ou seja, tanto ensaios de petrografia como ensaios químicos para avaliação dos agregados não são capazes de classificar um mineral como reativo sem testes complementares, como o de expansão em amostras de argamassa ou concreto (RILEM, 2013; SANCHEZ et al., 2017a). Por este motivo, a NBR 15577-2 (ABNT, 2018d) estabelece que fornecedores de agregados devem realizar a cada 6 meses ensaios acelerados em argamassa e a cada um ano os ensaios de longa duração em concreto.

4.1.2 Métodos de avaliação da expansão por RAS

Para a avaliação do risco de ocorrência de RAA e o estabelecimento de medidas preventivas com cada nível determinado de risco são necessárias as seguintes etapas (NETO; QUITETE; BATTAGIN, 2018): (a) Classificar as estruturas (a depender das consequências da RAA); (b) Determinar o grau de reatividade do agregado (baseado em ensaios de expansão em barras de argamassa aos 30 dias e prismas de concreto aos 365 dias); (c) Determinar o grau de risco (em função do grau de reatividade do agregado e das dimensões e condições de exposição das estruturas) e; (d) Estabelecer a intensidade da ação preventiva em função da classe de estrutura (que envolvem limitar o teor de álcalis, utilizar cimento com adições minerais ou ainda substituir o agregado).

Conforme discutido anteriormente, mesmo quando fases reativas são identificadas pela análise petrográfica, é necessário confirmar a relevância de sua presença no desenvolvimento da RAS por meio de testes de expansão. Na Tabela 4.2 são apresentadas as principais normativas utilizadas para a avaliação da RAS por expansão em concretos e argamassas.

Tabela 4.2 - Avaliação do potencial reativo da RAS em concretos e argamassas

Normativa ⁶	Ensaio	Condição	Amostra	Limite de expansão*
ASTM C1260 AASHTO T303 RILEM AAR-2 CSA A23.2-25A AS 1141.60.1	Potencial reativo acelerado em argamassa (AMBT)	Solução 1N NaOH a 80°C por 14 dias	3 prismas de argamassa 25x25x285mm	0,10%
NBR 15577-4	Potencial reativo acelerado em argamassa	Solução 1N NaOH a 80°C por 30 dias	3 prismas de argamassa 25x25x285mm	0,19%
ASTM C1293 NBR 15577-6 RILEM AAR-3 CSA A23.2-14A AS 1141.60.2	Potencial reativo em concreto (CPT)	1,25% Na ₂ O _{eq} a 38°C por 365 dias	3 prismas de concreto 75x75x285mm	0,04%
NBR 15577-7 RILEM AAR-4	Potencial reativo acelerado em concreto	1,25% Na ₂ O _{eq} a 60°C por 140 dias	3 prismas de concreto 75x75x285mm	0,03%

* Limites mínimos da NBR 15577

Fonte: Autoria própria

⁶ Considerando normativas internacionais sobre o tema (AASHTO, 2000; ABNT, 2018d, 2018f, 2018g; AS, 2014a, 2014b; ASTM, 2014d, 2018c; CSA, 2014c, 2014b; RILEM, 2016)

No Brasil, em 2018, foram revisadas e homologadas as partes 1 a 7 da norma NBR 15577 (ABNT, 2018a, 2018b, 2018c, 2018d, 2018e, 2018f, 2018g), que estabelecem os critérios para avaliação, classificação e mitigação da reação em novas construções. De acordo com a normativa, após análise petrográfica deve-se avaliar a expansão de prismas de concreto em função da formação do gel expansivo de RAA (HEWLETT; LISKA, 2019).

De uma forma geral, os dois ensaios mais utilizados para classificação da reatividade de agregados são o método acelerado em barras de argamassa à 80°C (AMBT – *Accelerated Mortar Bar Test*) e o método em prismas de concreto à 38°C (CPT – *Concrete Prism Test*), nos quais é possível atrelar o resultado de expansão à classificação quanto ao grau de risco e de ocorrência da RAS, conforme apresentado na Tabela 4.3 e Tabela 4.4, respectivamente.

Tabela 4.3 - Classificação do grau de reatividade potencial do agregado

Classificação da reatividade potencial do agregado	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias	Expansão dos prismas de concreto aos 365 dias
R0	< 0,19%	< 0,04%
R1	0,19 a 0,40%	0,04 a 0,12%
R2	0,41 a 0,60%	0,13 a 0,24%
R3	> 0,60%	> 0,24%

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018a)

Tabela 4.4 - Classificação do grau de ocorrência da RAS

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R3	R3
Não maciço em ambiente seco	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas, expostas à umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito alto
Todas as estruturas em contato com álcalis em condições de serviço	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito alto

Fonte: NBR 15577-1 (ABNT, 2018a)

A classificação da Tabela 4.3 para o ensaio em argamassa foi baseada no tratamento de dados estatísticos de ensaios em agregados brasileiros, enquanto para o ensaio em concreto a classificação foi extraída da ASTM C1778 (ASTM, 2020a). Até o momento de edição da norma brasileira, não se dispunha de dados estatísticos nacionais suficientes para classificar o grau de reatividade do agregado segundo o método acelerado de prismas de concreto (1,25% Na₂O_{eq} a 60°C por 140 dias). Assim, para estes ensaios, os limites adotados no Brasil são os mesmos de normativas internacionais como ASTM C1778 (ASTM, 2020b) e RILEM AAR-4 (RILEM, 2013). Ainda que apresente diferentes métodos de avaliação, a NBR

15577 (ABNT, 2018a) considera os ensaios acelerados como complementares na tentativa de indicação mais rápida da reação, mas não exclui a necessidade da realização do ensaio em prismas de concreto até a idade de 365 dias.

No caso de estudos de mitigação, a normativa indica o monitoramento por 2 anos de prismas de concreto à 38°C (CPT). Isto ocorre pois, de acordo com a norma brasileira, os demais ensaios podem apresentar falso positivo ou falso negativo. No caso do ensaio acelerado em argamassa, Thomas et al. (2006) explicam que o teor de álcalis utilizado para produzir uma expansão neste teste é muito maior que a aplicada no método dos prismas de concreto, acabando por gerar resultados não confiáveis.

De acordo com as recomendações do *Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures* da RILEM (RILEM, 2016), existem ainda outras geometrias e idades de ensaio possíveis, contudo são escassos os estudos em que estas metodologias são aplicadas na avaliação da reatividade de agregados. As normativas NBR15577-5 (ABNT, 2018a) e ASTM C1567 (ASTM, 2013) tratam da mitigação da expansão avaliada pelo método da barra argamassa em ensaio acelerado. Já as normativas ASTM C586 (ASTM, 2019) e ASTM C1105 (ASTM, 2016) tratam da avaliação da reação álcali-carbonato.

Todos os ensaios de expansão indicados na Tabela 4.2 baseiam-se em leituras da variação dimensional das amostras por meio de um relógio comparador ou micrômetro. A acurácia desta leitura depende da correta instalação de pinos metálicos na amostra e do correto encaixe do instrumento de leitura na amostra, que deve ser realizado por profissional treinado. As leituras são realizadas de forma manual em amostras que sofrem ciclos de aquecimento e resfriamento, o que também pode afetar as leituras. A ASTM C1293 (ASTM, 2018) cita que para expansões superiores à 0,02%, os coeficientes de variação do ensaio chegam a 12%. Esta variação está atrelada, além dos procedimentos de leitura, à variação do teor de agregados em cada amostra.

Até o presente momento não foi possível encontrar na literatura estudos que avaliem expansões a longo prazo em amostras de concreto com RAS utilizando FBG. O uso de sensores FBG permitiria uma maior precisão na leitura da expansão de barras e prismas, além de possibilitar a realização de medidas discretas ao longo do tempo de ensaio. Com a utilização de pares de FBG também seria possível a compensação da temperatura e eliminação de seus efeitos nas leituras realizadas.

4.1.3 Ensaios para diagnóstico da RAS

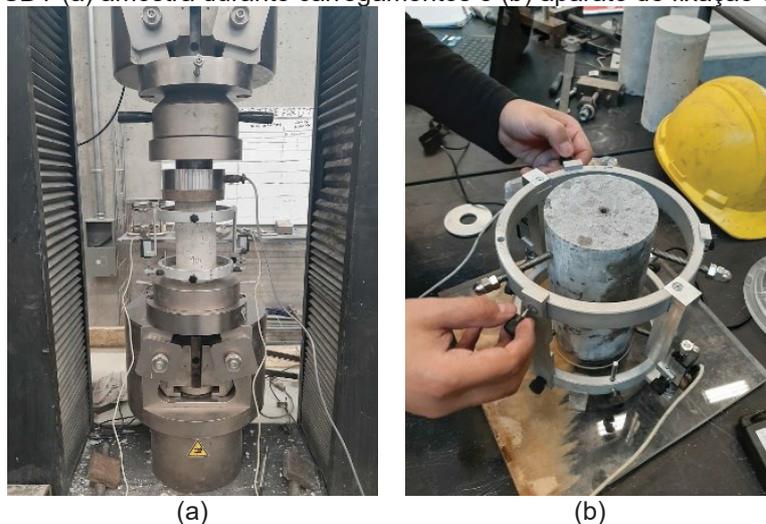
A inspeção visual é um dos primeiros passos para auxiliar no diagnóstico da RAS, bem como o levantamento de dados históricos, locais e do projeto da estrutura. Além de medidas de expansão em amostras, alguns métodos complementares têm sido utilizados no diagnóstico e avaliação do grau de dano em concretos submetidos à mecanismos de degradação. Dentre eles, os mais utilizados são a emissão acústica (ABDELRAHMAN et al., 2015; BOUKARI et al., 2015; FARNAM et al., 2015; LOKAJICEK et al., 2017), o ensaio SDT ou *Stiffness Damage Test* (GUO; WALDRON, 2000; NADEEM; MEMON; LO, 2013; SANCHEZ et al., 2014a, 2016a) e o ensaio *DRI ou Damage Rating Index* (RIVARD; FOURNIER; BALLIVY, 2002; SANCHEZ et al., 2016b, 2015b, 2017a).

O ensaio *Stiffness Damage Test* (SDT) é um método de ensaio mecânico cíclico de compressão, usado para avaliar o grau de deterioração do concreto afetado por mecanismos expansivos, como a reação álcali-sílica, reação sulfática interna, ou ainda mecanismos de gelo-degelo. O SDT foi inicialmente desenvolvido por Walsh (1962) para avaliação de rochas e teve seu procedimento otimizado por Sanchez et al. (2014a, 2015a, 2016a) para avaliação da RAS em concreto. O ensaio se baseia no aumento de descontinuidades no interior do concreto gerada pela expansão do gel e fissuração das amostras. A execução do ensaio pode ser observada na Figura 4.5 e consiste em realizar cinco ciclos de compressão em uma amostra, fazendo com que suas fissuras se fechem e plastifiquem, a fim de gerar a histerese⁷ da curva tensão-deformação ao longo dos ciclos de carregamento, cujas áreas são medidas (SANCHEZ et al., 2017a).

A partir do ensaio, parâmetros como área de histerese, deformação plástica e módulo de elasticidade podem ser obtidos para as amostras. Também é possível o cálculo do Índice de deformação plástica (PDI ou *Plastic Deformation Index*) e do Índice de Dano de rigidez (SDI ou *Stiffness Damage Index*), que representam a razão entre a deformação plástica e a deformação total, e entre a energia dissipada e a energia total ao longo dos ciclos, respectivamente. Estes parâmetros são capazes de fornecer uma avaliação do grau de dano do concreto afetado por mecanismos expansivos (SANCHEZ et al., 2014a).

⁷ Na física, a histerese é definida como a tendência de um sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou, ou ainda, como a capacidade de preservar uma deformação efetuada por um estímulo – deformação plástica (CALLISTER; RETHWISCH, 2009)

Figura 4.5 - Ensaio SDT (a) amostra durante carregamentos e (b) aparato de fixação da amostra de concreto

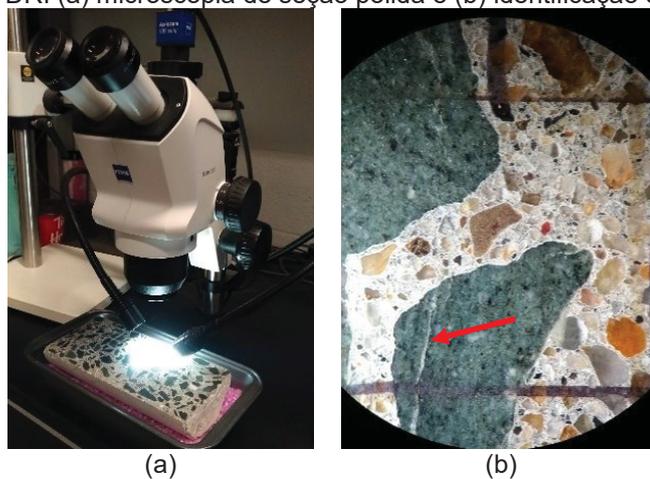


Fonte: Autoria própria

Os resultados do ensaio têm mostrado correlação positiva entre o SDT e o nível de expansão por reação álcali-agregado e formação de etringita tardia, independentemente dos tipos de agregados e das propriedades mecânicas do concreto (PEDROSO, 2020). Em 2021, o teste foi publicado na Instrução Técnica ITDSBE001 de FURNAS (HASPARYK; SANCHEZ, 2021), podendo ser aplicado tanto como uma ferramenta auxiliar em diagnósticos de reações expansivas, quanto na caracterização de concretos moldados em laboratório e monitorados no tempo. Além disso, é possível também realizar o ensaio em testemunhos (SANCHEZ et al., 2016a).

O ensaio *Damage Rating Index (DRI)*, por sua vez, consiste em uma análise semiquantitativa microscópica, cujo objetivo principal é a avaliação do grau de deterioração do concreto. Esse método foi inicialmente proposto por Grattan-Bellew e Danay (1992) para a avaliação do grau de desenvolvimento da reação álcali-agregado, sofrendo modificações ao longo dos anos (SANCHEZ et al., 2016b, 2015b) para avaliar a deterioração do concreto oriunda de diversos mecanismos. O método ainda pode ser aplicado para avaliação da eficiência de adições minerais, cristalizantes e auto cicatrização no preenchimento de fissuras (DE SOUZA; SANCHEZ, 2023b). O DRI é realizado através da contagem e classificação de fissuras (a depender do tipo e localidade da mesma) em uma seção polida de concreto (Figura 4.6), gerando um índice referente à deterioração da amostra.

Figura 4.6 - Ensaio DRI (a) microscopia de seção polida e (b) identificação de fissura em agregado

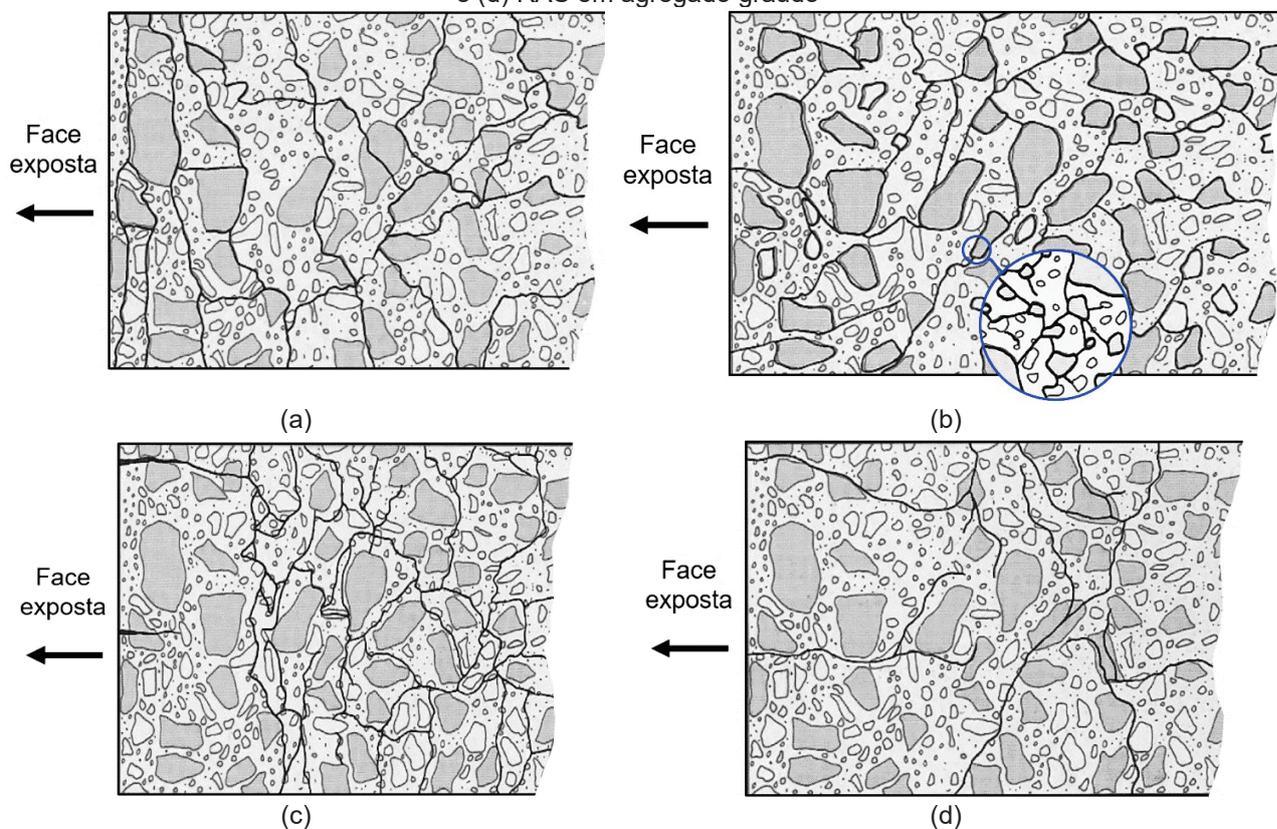


Fonte: Autoria própria

A partir da verificação do modelo de fissuração no concreto, ou seja, local onde a fissura inicia e como ocorre seu avanço na amostra, é possível confirmar o mecanismo de degradação que age no concreto. No caso de danos causados por ciclos de gelo e degelo, a fissuração se desenvolve principalmente na argamassa e propaga-se através da zona de transição, uma vez que estas zonas apresentam uma menor resistência à fratura e são mais porosas (Figura 4.7a), sendo a face exposta a intempéries mais danificada. Quando ocorre formação de etringita tardia, ocorre a expansão da pasta de cimento que se desprende das partículas de agregado e os vazios criados na zona de transição são progressivamente preenchidos por etringita sem fissuração nos agregados (Figura 4.7b). No caso da RAS, devido ao uso de agregado miúdo (Figura 4.7c) ou gráudo reativo (Figura 4.7d), a fissuração tem origem no interior ou ao redor de partículas de agregados com posterior formação de produtos de reação.

O DRI costuma ser utilizado de maneira conjunta com o SDT para uma análise denominada multinível, facilitando o diagnóstico da RAS (HASPARYK; SANCHEZ, 2021). Estudos realizados demonstram boa correlação entre os parâmetros do ensaio SDT, DRI e medidas de expansão (ISLAM; GHAFUORI, 2018; RIVARD; FOURNIER; BALLIVY, 2002; SANCHEZ et al., 2016b, 2014a, 2016a, 2017a). Neste sentido, Sanchez et al. (2017b) propõe uma análise multiparâmetro para a estimativa da expansão potencial em estruturas afetadas pela RAS, conforme apresentado na Tabela 4.5, a partir de dados de 20 concretos, utilizando 13 agregados reativos.

Figura 4.7 - Padrões de fissuração no concreto: (a) gelo-degelo, (b) etringita tardia, (c) RAS em agregado miúdo e (d) RAS em agregado graúdo



Fonte: Traduzido de BCA (1992) apud Sanchez (2014)

Tabela 4.5 - Classificação de dano multiparâmetro baseada nos ensaios SDT e DRI

Grau de dano	Expansão (%)	SDI (%)	DRI (-)
Negligenciável	0,02 ± 0,01	6 a 16	100 a 155
Marginal	0,04 ± 0,01	11 a 25	210 a 400
Moderado	0,11 ± 0,01	15 a 31	330 a 500
Alto	0,20 ± 0,01	19 a 32	500 a 765
Muito alto	0,30 ± 0,01	22 a 36	600 a 925

Fonte: Traduzido de Sanchez et al. (2017b)

Os autores explicam que os níveis de expansão não devem ser considerados como limites rígidos entre as várias classes de grau de dano, mas sim como níveis de referência para os quais foi efetuada uma análise comparativa de dados que permitiu evidenciar níveis de danos significativos no concreto devido à progressão da RAS.

Os ensaios normatizados existentes que avaliam o grau de expansão em concreto podem ser considerados confiáveis, porém, tem longa duração e grande variabilidade. Por outro lado, ensaios como emissão acústica, SDT e DRI demonstram um bom desempenho no diagnóstico complementar da RAS.

O uso de fibras óticas na instrumentação de peças de concreto tem o potencial de reduzir as variações encontradas nos ensaios de expansão realizados em pinos metálicos. Além disso, os sensores em fibra ótica podem auxiliar na compreensão da reação no interior dos agregados e na medida das expansões internas da matriz cimentícia (argamassa que envolve os grãos). A geração de tensões internas é prevista apenas em modelos teóricos, baseados em propriedades químicas e físicas dos materiais (CAPRA; BOURNAZEL, 1998; KIM; OLEK, 2014; MULTON; SELLIER; CYR, 2009; SANCHEZ et al., 2014b; SAOUMA; PEROTTI, 2006; ZECH; SETZER, 1988), mas ainda carece de comprovação experimental devido à complexidade da instrumentação dos grãos.

Assim, o objetivo deste capítulo é **realizar a caracterização de um agregado reativo e o monitoramento tradicional de prismas de concreto. Além disso, serão realizadas medidas de expansão interna e externa de cilindros de concreto sob efeito de RAS por meio de sensores FBG, com posterior comparação dessas medições com leituras manuais de expansão. Por fim, pretende-se avaliar o grau de dano nas amostras afetadas pela reação RAS.**

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.2.1 Seleção do agregado potencialmente reativo

Para a realização deste estudo, foi realizada a coleta de agregados potencialmente reativos em uma saibreira de gnaiss localizada no município brasileiro de São José dos Pinhais, no estado do Paraná (Figura 4.8). O gnaiss é uma rocha metamórfica, resultante de modificações decorrentes da aplicação de temperatura e/ou pressão em rochas pré-existentes, que podem gerar alterações em sua microestrutura e torná-las susceptíveis à RAS (NETO, 2022).

Figura 4.8 - Posição geográfica da região de coleta das amostras



Fonte: Autoria própria

De acordo com o Mapa Geológico e de Recursos Minerais do estado do Paraná de 2021 (BESSER; BRUMATTI; SPISILA, 2021), a região da saibreira encontra-se sobre uma falha entre duas unidades litoestratigráficas: (a) Complexo Atuba, com formação de gnaisses bandados e presença de: biotita e biotita-homblenda gnaiss, biotita gnaiss porfiroclástico, gnaiss granítico leucocrático e anfibólito, intercalações de cianita-biotita-muscovita gnaiss; e a (b) Bacia Guabirotuba, com presença de rochas graníticas com e sem epídoto magmático, com proporções variadas de biotita e anfibólito, e frequentemente com megacristais de K-feldspato, protomiloníticas a ultramiloníticas.

Durante a visita à saibreira (Figura 4.9), foi possível identificar diferentes perfis geológicos na frente de lavra que estava sendo explorada. Os agregados graúdos foram coletados da saída das esteiras, e amostras de rocha são para análise petrográfica foram retiradas das três regiões apresentadas na Figura 4.9b (amostras R1, R2 e R3). Para a moldagem dos concretos foi utilizado agregado miúdo potencialmente inócuo de origem natural da região de Curitiba-PR, previamente avaliado em laboratório.

Figura 4.9 - Fotografias da saibreira (a) visão da saída das esteiras e (b) perfil geológico



Fonte: Autoria própria

O estudo preliminar realizado por Langaro (2023), em agregados coletados na mesma jazida, demonstrou potencial reativo dos agregados no ensaio acelerado em argamassa, com expansão de 0,25% segundo NBR 15577-4 (ABNT, 2018b) aos 30 dias.

4.2.2 Caracterização dos materiais

Para a produção do concreto foi utilizado cimento Portland CPV-ARI, que possui até 10% de fíler calcário em relação à massa de clínquer (ABNT, 2018h). A caracterização físico-química do cimento foi obtida diretamente com o fabricante. A distribuição granulométrica do cimento foi obtida por difração à laser, realizada em analisador de tamanho de partículas (CILAS 920) com capacidade para leituras entre 0,3 e 400 μm e utilizando LASER diodo de 850 nm. A dispersão do material foi realizada por pulverização em peneira de 355 μm , dissolução em álcool isopropílico sem utilização de agente dispersante e aplicação de ultrassom por 60 segundos (DAMINELI; PILEGGI; JOHN, 2017; DE ALMEIDA et al., 2017).

A análise da composição química dos agregados foi realizada em um espectrômetro de fluorescência de raios X (Panalytical, modelo Axios Max) por dispersão de comprimento de onda (WDXRF), utilizando a fração passante em peneira com abertura de 0,045 mm. Posteriormente foi preparada pastilha fundida com tetraborato de lítio e as amostras foram ensaiadas sob vácuo, por meio de análise quantitativa corrigida pela perda ao fogo à 1000°C.

A análise dos compostos mineralógicos dos agregados foi realizada na forma de pó em difratômetro de raios X – DRX (Shimatzu Co., modelo XRD-7000, operando a 30 kV, 30 mA). Os parâmetros de ensaio foram: ângulo de 5° a 75°, passo de 0,02° e velocidade de

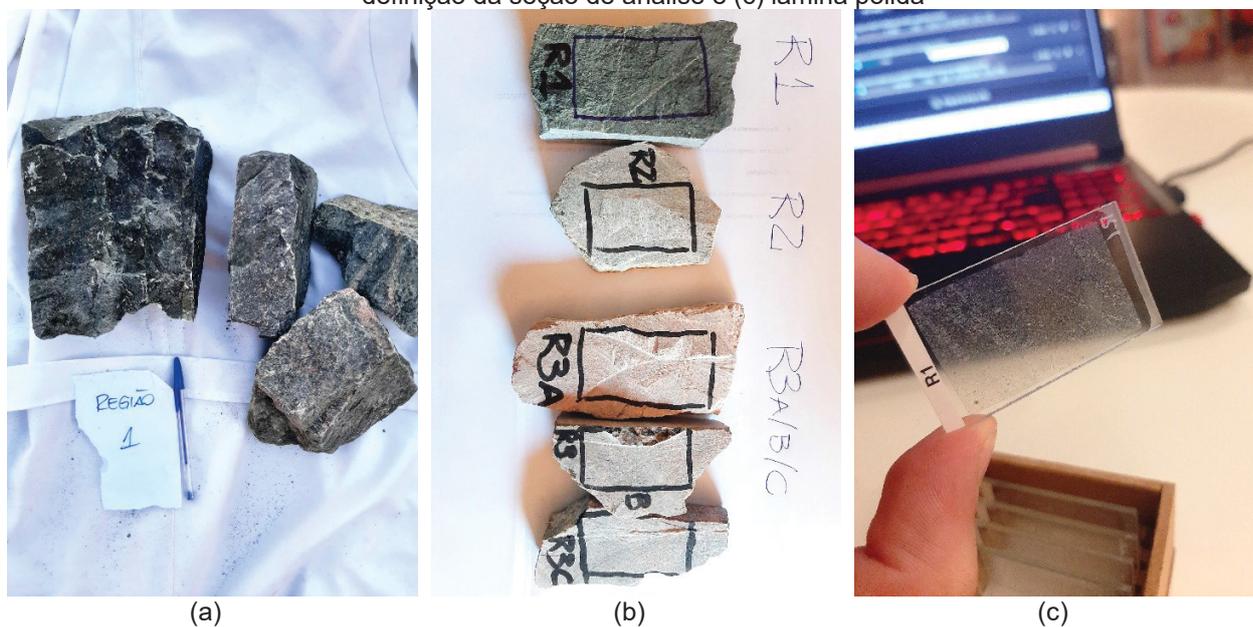
varredura de 2°/min. A análise dos resultados foi realizada com auxílio do software *X'Pert Highscore Plus* com um banco de dados cristalográfico do ICDD (*International Centre for Diffraction Data*) de 2003. A análise térmica diferencial (ATD) e a análise termogravimétrica (ATG) dos materiais foi realizada em Sistema de Análises Térmicas (BP Engenharia, modelo RB-3000), operando com uma taxa de aquecimento de 10°C/min até a temperatura de 1100°C, sob atmosfera de nitrogênio.

Os agregados foram submetidos a uma série de ensaios para sua caracterização física. A massa específica foi determinada conforme as normas NBR 16916 (ABNT, 2021a) e NBR 16917 (ABNT, 2021b), enquanto a massa unitária solta e compactada foi avaliada de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021c). A absorção dos agregados foi medida pelas normas NBR 16917 (ABNT, 2021b) e NBR 16916 (ABNT, 2021a), e o material pulverulento foi determinado pela NBR 16973 (ABNT, 2021d). A granulometria dos agregados, por sua vez, foi avaliada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003a).

As amostras de rocha são coletadas na jazida foram submetidas ao ensaio de análise petrográfica, de acordo com a NBR 15577-3 (ABNT, 2018c). Uma amostra foi coletada da Região 1, uma amostra da Região 2 e três amostras da Região 3, por representar a maior parte do maciço da jazida, totalizando cinco amostras - Figura 4.9b. As amostras de rocha são coletadas foram reduzidas, os planos de análise foram identificados e as amostras enviadas à um laboratório especializado para o preparo de lâmina delgada de rocha polida (Figura 4.10). Nesse processo, uma película com aproximadamente 30 µm de espessura é colada sobre a superfície de uma lâmina de vidro com dimensões de 27x46x2mm. Em seguida, é realizado o acabamento da amostra utilizando suspensão de diamante.

O ensaio de petrografia foi conduzido por um petrógrafo no laboratório de pesquisa em microscopia do Departamento de Geologia da UFPR utilizando microscópio de luz transmitida com polarizadores (Nikon Eclipse E200POL), seguindo as prescrições da NBR 15577-3 (ABNT, 2018c) e o atlas petrográfico publicado em RILEM TC 219-ACS (FERNANDES et al., 2016) como referência.

Figura 4.10 - Preparo das lâminas delgadas, (a) coleta de amostra indeformada, (b) redução de amostra e definição da seção de análise e (c) lâmina polida



Fonte: Autoria própria

4.2.3 Dosagem do concreto

Para monitorar a expansão de corpos de prova devido ao desenvolvimento da reação álcali-silica, foram moldadas amostras de concreto utilizando a composição apresentada na Tabela 4.6, seguindo as recomendações da NBR 15577-6 (ABNT, 2018f).

Tabela 4.6 - Dosagem do concreto

Material	Consumo (kg/m ³)	Massa específica (g/cm ³)
Cimento	420,00	3,13
Areia	747,15	2,70
Brita 0	467,24	2,65
Brita 1	589,57	2,65
Água	189,00	1,00

Fonte: Autoria própria

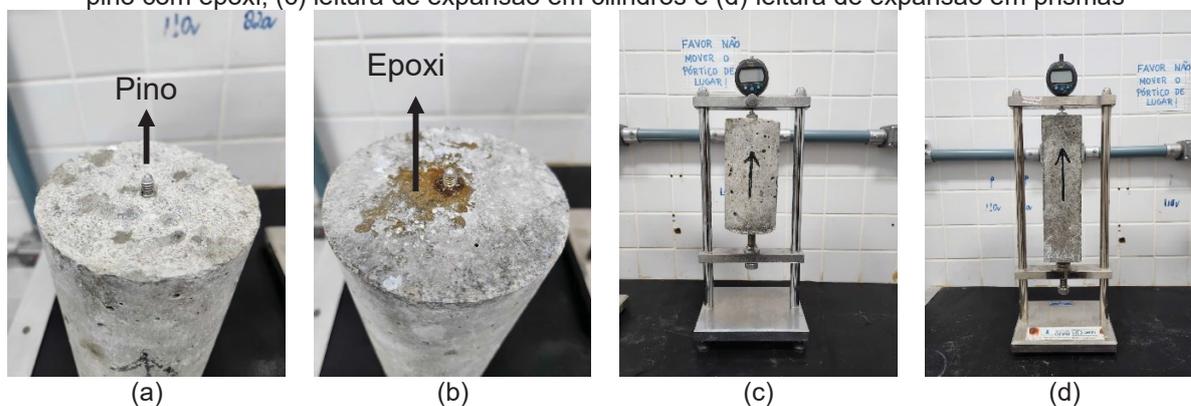
Para a confecção das amostras foi utilizado agregado miúdo natural e uma mistura de agregados graúdos reativos (44% de brita 0 + 56% de brita 1) de forma a compor a distribuição granulométrica exigida pela NBR 15577-6 (ABNT, 2018f). O teor de álcali equivalente proveniente de teor de sódio e potássio do clínquer ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) foi elevado para 1,25% utilizando NaOH P.A., de forma a acelerar o processo de expansão conforme preconizado pela

normativa. O concreto produzido obteve um abatimento de 10 ± 2 cm no ensaio do índice de consistência (*Slump Test*), realizado conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998).

4.2.4 Leituras de expansão com pinos

Para a avaliação da RAS, foram utilizados 4 prismas (75x75x1000) mm e 8 cilindros ($\varnothing 100 \times 200$) mm de concreto. A moldagem dos prismas de concreto já com os pinos seguiu as prescrições da NBR 15577-6 (ABNT, 2018f). Para as amostras cilíndricas, ainda durante a moldagem, pinos metálicos foram inseridos no topo de cada amostra. Após 24 h, as amostras foram desmoldadas e pequenos furos (5 mm de diâmetro por 10 mm de comprimento) foram feitos na outra extremidade de cada cilindro. Em seguida, os pinos foram fixados nesses furos utilizando cola epóxi. Esta abordagem de avaliação da RAS em amostras cilíndricas tem sido utilizada por outros autores devido à facilidade de moldagem e uso dessa geometria (SANCHEZ et al., 2014a, 2015a, 2016a, 2017a). Detalhes da posição e leitura dos pinos metálicos podem ser observados na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Detalhe das leituras de expansão: (a) inserção dos pinos após moldagem, (b) embutimento do pino com epóxi, (c) leitura de expansão em cilindros e (d) leitura de expansão em prismas



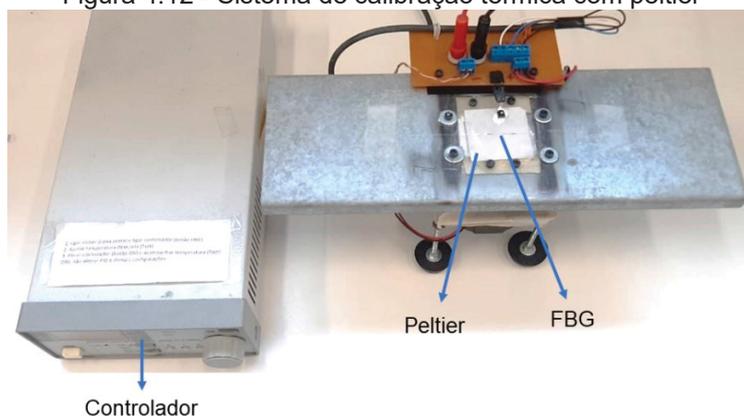
Fonte: Autoria própria

Os procedimentos de cura em temperatura ambiente (22°C e 100% U.R.), armazenamento em câmara úmida à 38°C e medidas de expansão seguiram as prescrições da norma brasileira. As leituras em cada amostra foram realizadas mensalmente até atingir a idade de 365 dias, utilizando relógio comparador digital (Mitutoyo), com precisão de 0,001 mm. Durante cada leitura, foi registrada também a variação de massa das amostras.

4.2.5 Leituras de expansão com sensor FBG

Além das leituras de expansão com pinos, foram moldados 15 corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 100 \times 200$) mm para realização de leituras de expansão utilizando sensores em fibra ótica. Os sensores foram inseridos nos cilindros de concreto durante a moldagem para o monitoramento da expansão interna da matriz e do agregado, e foram aplicados na superfície externa do corpo de prova, após a desmoldagem. A fabricação dos sensores seguiu o procedimento descrito no item 3.2.2 desta tese, e a calibração do coeficiente de deformação dos sensores seguiu procedimento descrito no item 3.2.2. O sistema utilizado para calibração térmica dos sensores pode ser observado na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Sistema de calibração térmica com peltier

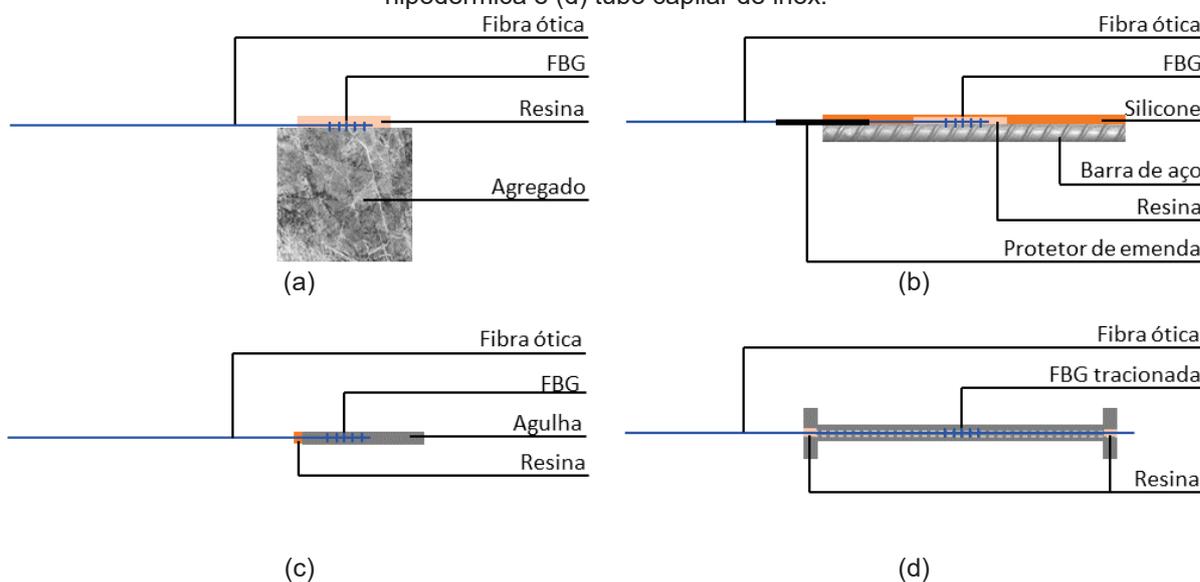


Fonte: Autoria própria

Para a calibração dos coeficientes de temperatura foi utilizada placa peltier termoelétrica (12V, TEC1-12706) e controlador térmico (TED200, Thorlabs), em patamares de temperatura de 25 a 75°C com aplicação de pasta térmica sobre o sensor para auxiliar na transferência térmica – conforme ilustrado na Figura 4.12. Detalhes da instalação dos sensores FBG podem ser observados na Figura 4.13 e Figura 4.14.

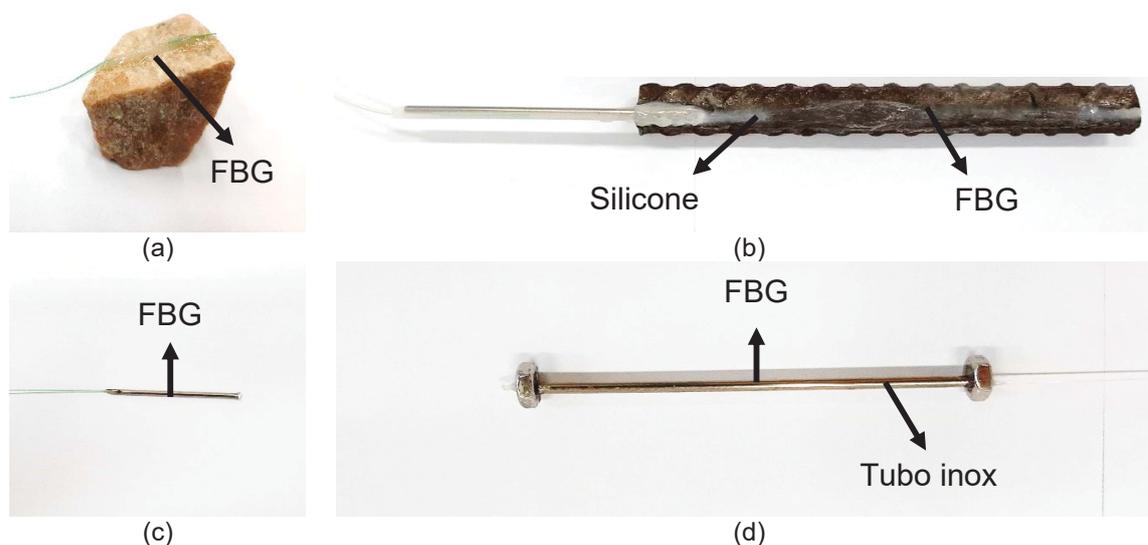
Primeiramente, para a instrumentação interna, o sensor FBG foi fixado na superfície de agregados (Figura 4.14a), utilizando resina fotopolimerizável em toda a extensão do sensor. Para esta instrumentação foram selecionados agregados cúbicos, com aresta de aproximadamente 10 mm.

Figura 4.13 - Detalhe da instalação dos sensores FBG em (a) agregados, (b) barras de aço, (c) agulha hipodérmica e (d) tubo capilar de inox.



Fonte: Autoria própria

Figura 4.14 - Imagem dos sensores FBG instalados em (a) agregados, (b) barras de aço, (c) agulha hipodérmica e (d) tubo capilar de inox.



Fonte: Autoria própria

Já para a instrumentação da matriz de argamassa, os sensores foram fixados longitudinalmente sobre barras de aço CA-50 (Figura 4.14b). Para isso, barras de 10 mm de diâmetro e 100mm de comprimento passaram primeiramente por um processo de limpeza, realizada por polimento com micro retífica. Posteriormente foi realizada a colagem do sensor, que também utilizou resina fotopolimerizável em toda a extensão do sensor. Toda a região do

sensor foi protegida com silicone após cura da resina, de forma semelhante ao estudo conduzido por Kister et al. (2007).

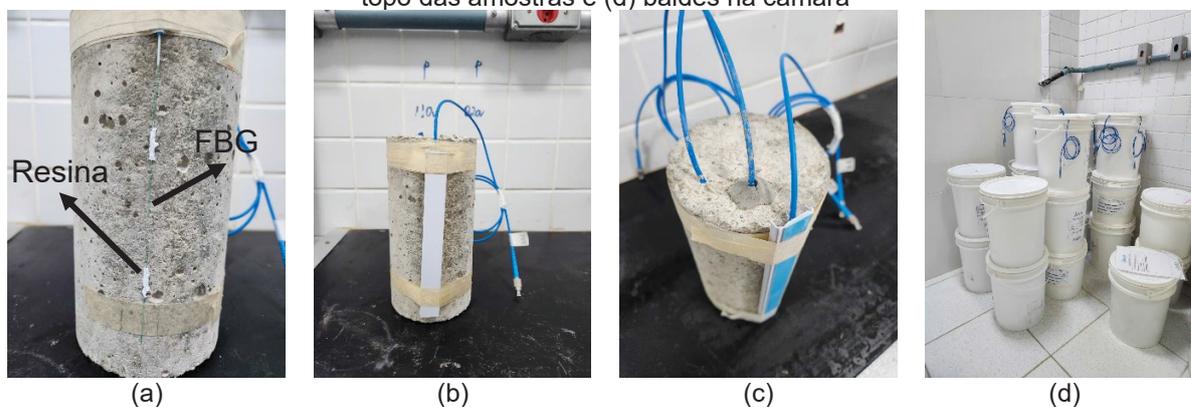
Ainda para a instrumentação da matriz de argamassa foi utilizado sensor FBG encapsulado em tubo capilar de aço inox AISI 304, conforme Figura 4.14d. O tubo utilizado possui diâmetro interno de 3 mm, comprimento de 100 mm, e porcas fixadas em suas extremidades para criar pontos de ancoragem. A FBG foi inserida no tubo, tracionada (cerca de 1 nm de deslocamento espectral) e colada com a resina nas extremidades do tubo, permitindo também leituras de retração, se ocorressem.

Para compensação térmica, sensores FBG com a extremidade livre foram inseridos no interior de agulhas hipodérmicas de dimensão 40x1,20mm (Figura 4.14c). A extremidade final da agulha foi selada e a outra extremidade (de entrada da fibra) foi isolada com resina fotopolimerizável.

Todos os sensores encapsulados foram inseridos no terço médio das amostras de concreto durante o processo de concretagem. Em todas as regiões onde foram aplicadas colas ou resinas, o acrilato foi removido para garantir a aderência adequada entre o vidro e a cola. As fibras óticas contendo os sensores foram conectadas a cabos FC/PC para possibilitar a conexão com o equipamento de interrogação de sinais.

Para a medida externa das deformações os sensores foram colados verticalmente na superfície das amostras, com espaçamento de 100 mm entre os pontos de ancoragem no terço médio do corpo de prova, como pode ser observado na Figura 4.15. Para a proteção da fibra nua durante o monitoramento, foi fixada cantoneira plástica sobre a região, sem contato com o sensor, (Figura 4.15b).

Figura 4.15 - Detalhe da instalação do sensor FBG (a) na superfície das amostras, (b) sistema de proteção, (c) topo das amostras e (d) baldes na câmara



Fonte: Autoria própria

Todas as amostras produzidas foram armazenadas em baldes na câmara climatizada à 38°C. Os baldes que continham as amostras instrumentadas com FBG foram adaptados com aberturas nas laterais superiores do recipiente, para permitir acesso aos conectores dos sensores em fibra ótica (Figura 4.15d) sem a necessidade de remoção das amostras do interior do balde.

Ressalta-se que diferentes configurações do ensaio foram planejadas, de modo a se verificar a existência de diferenças entre as leituras internas e externas, na matriz e nos agregados. As leituras com FBG foram realizadas nas mesmas idades das leituras manuais, utilizando interrogador ótico (MicronOptics, modelo SM-125), com aquisição do comprimento de onda refletido pela rede de Bragg por 30 segundos, totalizando 120 leituras em cada amostra. Na Tabela 4.7 é apresentado um resumo com o tipo de sensor e número de amostras avaliadas.

Tabela 4.7 - Amostras instrumentadas para avaliação da RAS

Geometria	Medida	Amostras	Sensores FBG
Prisma	Pino	4	-
	Pino	8	-
Cilindro	Agregado	15	3
	Argamassa		4
	Barra de aço		3
	Temperatura		8
	Superfície		15

Fonte: Autoria própria

Cabe citar que alguns sensores internos apresentaram interferências no sinal ao longo do ensaio de 365 dias. Estes sensores foram desconsiderados para a análise de dados, restando os sensores FBG indicados na Tabela 4.7. Uma discussão acerca da durabilidade dos sensores embutidos será realizada no Capítulo 5 desta tese.

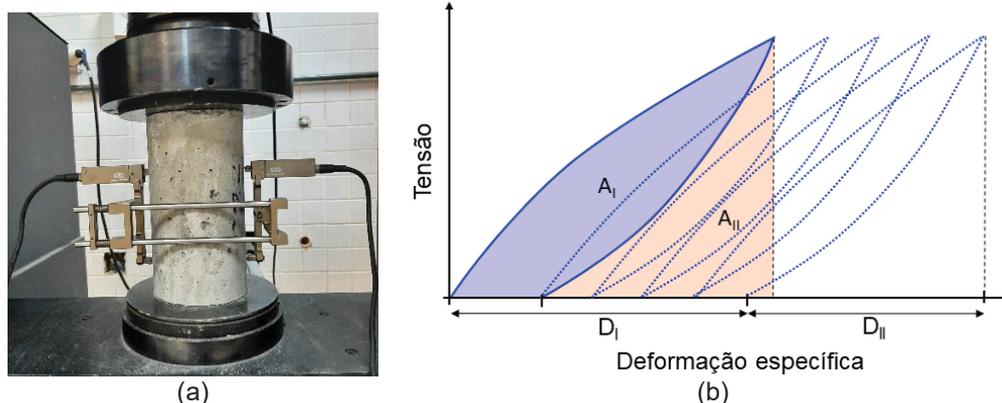
4.2.6 Ensaio para avaliação de dano por RAS

Para a avaliação das propriedades do concreto ao longo do tempo, no estado endurecido, foi realizado ensaio de resistência à compressão axial – conforme NBR 5739 (ABNT, 2018i) – utilizando prensa hidráulica (Fortest, 100t). O resultado representa a média de duas amostras avaliadas em cada idade.

A porosidade das amostras foi determinada através do ensaio de absorção de água sob vácuo, adaptado da normativa RILEM CPC 11.3 (RILEM, 1994), utilizando bomba à vácuo de 0,3 Pa. O resultado representa a média da absorção total de duas amostras avaliadas em cada idade.

Para avaliar a perda de rigidez do concreto, foi realizado o ensaio *Stiffness Damage Test* (SDT) em uma amostra para cada idade, conforme trabalho de Sanchez et al. (2017). Os autores indicam a utilização de carregamentos de 40% da carga de ruptura aos 28 dias e velocidade de ensaio de 0,10 MPa/s – por não alterarem significativamente as propriedades do material (DE SOUZA; SANCHEZ, 2023a). O ensaio foi realizado em prensa hidráulica (Instron, modelo 23-20), e a deformação específica durante os carregamentos foi registrada com o auxílio LVDTs fixados nas laterais da amostra, conforme Figura 4.16a.

Figura 4.16 - Ensaio SDT (a) fixação dos LVDT e (b) diagrama tensão deformação



Fonte: Autoria própria

Sanchez et al. (2016a) explicam que a utilização de valores absolutos da área de histerese e deformação plástica pode levar a interpretações/conclusões enganosas, uma vez que estes valores mudam significativamente de acordo com a resistência e composição do concreto. Conseqüentemente, a análise dos resultados do SDT de uma forma relativa, utilizando índices que levam em conta a relação de energia elástica pela energia total, caracteriza melhor a geração de danos para diferentes materiais. Assim, a partir do ensaio, foi realizado o cálculo do Índice de deformação plástica (PDI ou *Plastic Deformation Index*) e do Índice de Dano de rigidez (SDI ou *Stiffness Damage Index*), conforme Equações 4.5 e 4.6, na qual S_I é a histerese do primeiro ciclo e $(A_I + S_{II})$ é a energia total do primeiro ciclo de carregamento representada pela área total sob a curva tensão-deformação; enquanto D_I é a

deformação plástica ao final dos 5 ciclos e $(D_I + D_{II})$ é a deformações total após os 5 ciclos, conforme ilustrado na Figura 4.16b (GIANNINI et al., 2018).

$$SDI = \frac{S_I}{S_I + S_{II}} \cdot 100 \quad 4.5$$

$$PDI = \frac{D_I}{D_I + D_{II}} \cdot 100 \quad 4.6$$

O módulo elástico secante foi calculado conforme NBR 8552 (ABNT, 2008), com base no segundo e terceiro carregamento, por serem considerados os melhores parâmetros para a avaliação (SANCHEZ et al., 2014a).

As amostras também foram avaliadas pelo ensaio *Damage Rating Index* (DRI), que consiste na quantificação e classificação de fissuras. Para isso, amostras de concreto polidas são analisadas em microscópio ótico, e se atribui um fator de ponderação para cada tipo de fissura, conforme Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Característica de dano e fator empregado para a RAS

Sigla	Característica	Fator de ponderação
CCA	Fissura no agregado graúdo <i>Cracks in coarse aggregate</i>	0,25
OCA	Fissura aberta no agregado graúdo <i>Opened cracks in coarse aggregates</i>	2
OCAG	Fissura preenchida por produtos de reação no agregado graúdo <i>Crack with reaction product in coarse aggregate</i>	2
DAP	Partícula de agregado desagregada/corroída <i>Disaggregate/corroded aggregate particle</i>	2
CAD	Descolamento do agregado graúdo (perda de aderência) <i>Coarse aggregate debonded</i>	3
CCP	Fissura na pasta de cimento <i>Cracks in cement paste</i>	3
CCPG	Fissura preenchida por produtos de reação na pasta de cimento <i>Cracks with reaction product in cement paste</i>	3

Fonte: Autoria própria

Para realização do ensaio é necessária a cuidadosa preparação das amostras. Para isso foi realizado, primeiramente, o corte das amostras cilíndricas no sentido longitudinal, utilizando uma serra diamantada. As amostras tiveram então suas superfícies polidas, utilizando lixadeira politriz angular a úmido e discos diamantados nas gramaturas 50, 100, 200, 400, 800, 1500 e 30000. Para cada gramatura o polimento durou cerca de 5 minutos, sendo que a última gramatura (30000) era realizada por pelo menos 15 minutos. Ao final dos

polimentos, as amostras eram analisadas no microscópio ótico para garantir que sua superfície não apresentava riscos ou imperfeições que pudessem interferir na identificação e classificação das fissuras.

Após o polimento das amostras de concreto foi desenhada uma malha quadriculada de 10x10mm em sua superfície, totalizando 144 quadrados na amostra cilíndrica. Cada quadrado dessa malha foi então analisado individualmente (RIVARD; BALLIVY, 2005; SANCHEZ et al., 2015b; SANCHEZ; DRIMALAS; FOURNIER, 2020), utilizando microscópio estereoscópico com ampliação de 16X e luz refletida em uma amostra para cada idade, sendo o resultado normalizado para 100 cm².

Considerando a natureza subjetiva do ensaio de microscopia, o autor do presente trabalho dedicou um período de 6 meses durante seu doutorado sanduíche na Universidade de Ottawa para receber um treinamento especializado. Esse treinamento visava a realização do ensaio DRI em diversas amostras com índices DRI já conhecidos, a fim de obter uma compreensão mais aprofundada da contagem e classificação de fissuras. O grupo de pesquisa da referida Universidade tem investigado o uso de técnicas de inteligência artificial com intuito de minimizar a influência do operador e otimizar o tempo necessário para realização do ensaio (BEZERRA; TROTTIER; SANCHEZ, 2022).

Para a classificação e avaliação do tamanho da abertura de fissuras abertas em agregado (OCA), foi utilizada ferramenta com ponta de diâmetro de 0,1 mm. Quando a extremidade da ferramenta ficava presa dentro de uma fissura ao ser pressionada sobre a superfície da amostra, a fissura era considerada aberta, por apresentar abertura superior à 0,1 mm. A classificação de agregado desagregado/corroído (DAP) era adotada quando a partícula possuía elevado número de fissuras que não podiam ser quantificadas. Fissuras que cruzavam dois quadrados eram contabilizadas em cada um dos quadrados analisados, e fissuras na zona de transição (borda de agregados) eram consideradas fissuras na pasta.

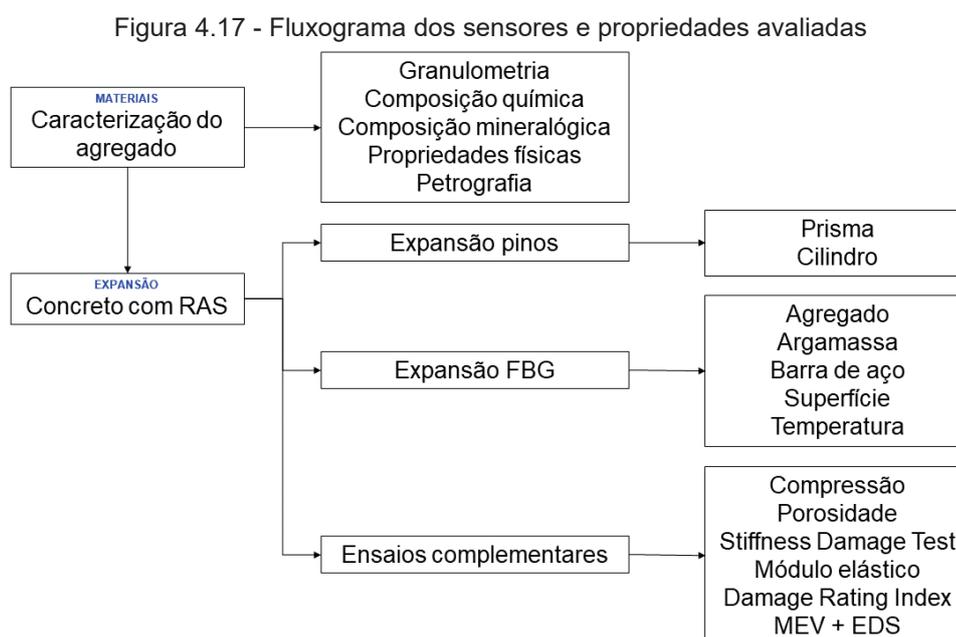
Para ilustrar os processos de fissuração nas amostras, foi utilizado microscópio portátil digital (Jiayi, modelo 31000) com resolução de 2.0MP. Esse equipamento permitiu capturar micrografias na superfície polida das amostras, mostrando detalhes das fissuras presentes.

Os ensaios de compressão, porosidade, SDT e DRI foram realizados nas idades de 28, 56, 90, 180, 270 e 365 dias em amostras independentes.

4.2.7 Análise da microestrutura

Ao final do período de monitoramento da RAS, ensaios adicionais na microestrutura foram realizados para confirmar a reação no concreto. Para isso, amostras fraturadas foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura - MEV (Zeiss, modelo EVO MA15).

Para a realização do ensaio, amostras com 365 dias foram fraturadas e secas em estufa a 50°C. Posteriormente as amostras foram fixadas em *stubs* metálicos com o auxílio de uma fita dupla face de carbono e envolvidas por uma fita de cobre que auxiliou na deposição do ouro durante a metalização. Não foi realizado nenhum tipo de embutimento, polimento ou ataque químico nas amostras. Para avaliação da composição química potencial do gel e demais elementos encontrados, foi realizada investigação da composição química por dispersão de energia de raios-X (EDS). A Figura 3.9 apresenta um fluxograma que resume os ensaios realizados neste capítulo.



Fonte: Autoria própria

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Caracterização dos materiais

Os resultados de caracterização do cimento utilizado para a confecção dos prismas de concreto foram obtidos com o fabricante, e são apresentados na Tabela 4.9. A partir dos resultados apresentados é possível afirmar que o cimento atende aos requisitos físicos e químicos da NBR 16697 (ABNT, 2018j).

Tabela 4.9 - Caracterização físico-química do CPV-ARI

Composição Química										
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P. Fogo	CaO I.	R. Ins.	Eq. Alc.	Densidade
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	g/cm ³
61,57	19,08	4,38	3,15	3,08	2,97	3,58	0,95	0,77	0,66	3,13
Características físicas										
Exp. Quente	Tempo de pega		Cons. Normal	Blaine	#200	#325	Resistencia à compressão (MPa)			
	Início	Fim					%	cm ² /g	%	%
0,05	203	248	30,1	4,443	0,10	0,44	24,3	40,4	46,3	54,6

FONTE: Dados fornecidos pelo fabricante

Com relação à caracterização dos agregados, os resultados da composição química por FRX estão apresentados na Tabela 4.10, enquanto a caracterização física pode ser encontrada, na Tabela 4.11.

Tabela 4.10 - Composição química por FRX dos agregados utilizados

Teor (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₃	Perda ao fogo
Agregado miúdo	88,74	5,34	3,08	0,00	0,00	0,83	0,00	0,72	0,00	0,00	1,29
Agregado graúdo	72,04	15,36	0,82	1,16	0,26	3,44	5,45	0,12	0,02	0,06	1,26

FONTE: Autoria própria

Com relação à composição química dos agregados graúdos, vale destacar a presença de elevado teor de sódio e potássio, que podem auxiliar no desenvolvimento da RAS. Considerando o consumo de materiais do traço indicado pela NBR 15577-6 (ABNT, 2018f), e levando em conta apenas a composição química do agregado graúdo, a mistura apresentaria um equivalente alcalino de 7,7%, valor 517% superior ao indicado pela normativa para induzir a RAS. Vale destacar que a NBR 7211 (ABNT, 2009b), que trata dos requisitos de agregados para produção de concreto não indica nenhum limite de teor de álcalis para sua utilização.

Contudo, diferente do sódio adicionado à mistura para induzir à RAS e dos álcalis presentes no cimento Portland, os álcalis presentes nos agregados não estão disponíveis no início da mistura para reagir, porém possuem a capacidade de contribuir para a continuidade da reação em idades avançadas. Desta forma, é importante confirmar a qual estrutura cristalográfica cada elemento está quimicamente combinado, e verificar seu potencial deletério e grau de amorfismo por meio de ensaios complementares. A distribuição granulométrica dos agregados, em conjunto com a do cimento Portland, é apresentada na Figura 4.18.

Tabela 4.11 - Caracterização dos agregados miúdos e graúdos

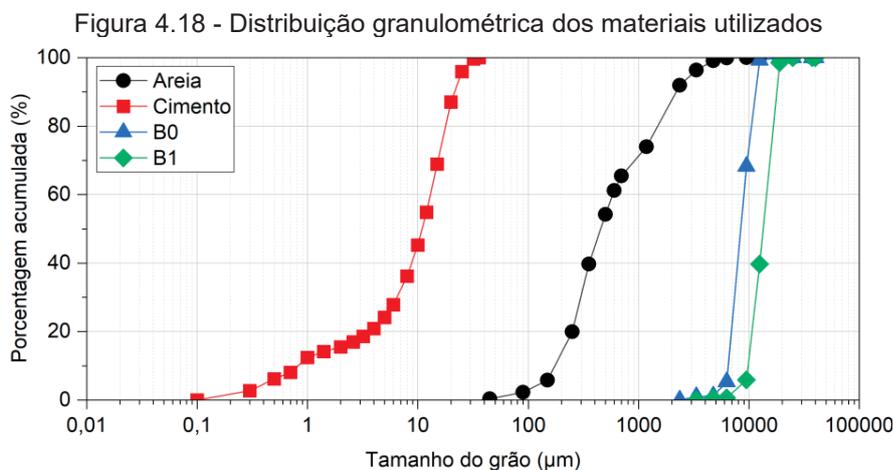
Ensaio	Normativa	Areia	Brita 0 (Z.G. ^c 4,75/12,5)	Brita 1 (Z.G. ^c 9,5/25)
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	2,695 ± 0,004	2,650 ± 0,008	2,648 ± 0,007
	NBR 16917 (ABNT, 2021b)			
Massa unitária solta (g/cm ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021c)	1,579 ± 0,004	1,383 ± 0,009	1,353 ± 0,009
Massa unitária compactada (g/cm ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021c)	1,658 ± 0,005	1,524 ± 0,003	1,491 ± 0,046
Absorção (%)	NBR 16917 (ABNT, 2021b)	1,40 ± 0,01	0,72 ± 0,04	0,53 ± 0,01
	NBR 16919 (ABNT, 2021a)			
Material pulverulento (%)	NBR 16973 (ABNT, 2021d)	3,007 ± 0,007	1,248 ± 0,099	0,996 ± 0,091
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003b)	D.M.C. ^A : 2,36mm M.F. ^B : 2,65	D.M.C. ^A : 9,5mm	D.M.C. ^A : 19 mm

^A D.M.C – dimensão máxima característica

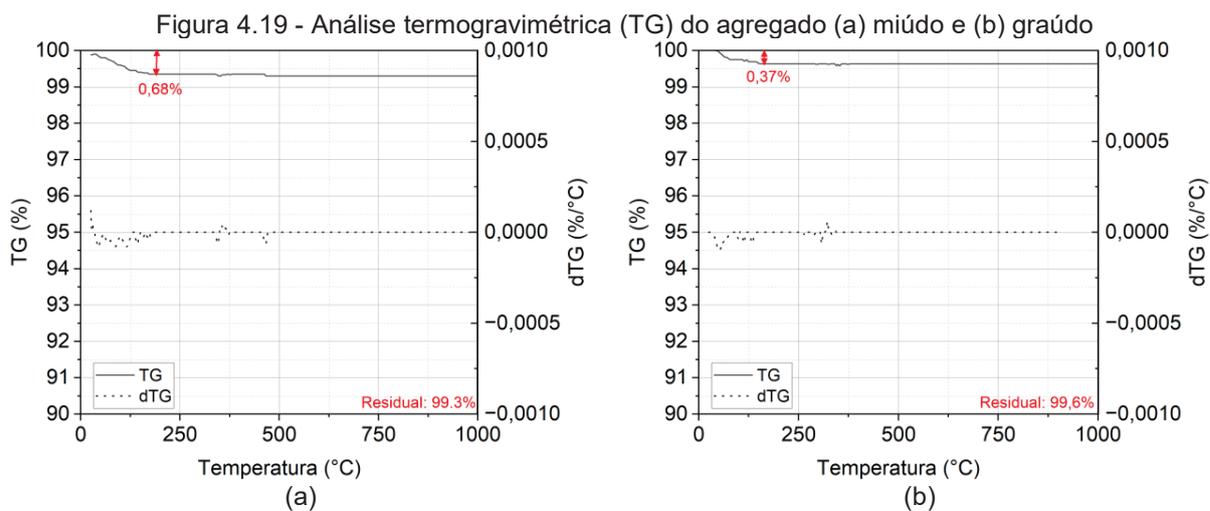
^B M.F. – módulo de finura

^C Z.G. – zona granulométrica conforme NBR 7211 (ABNT, 2009b)

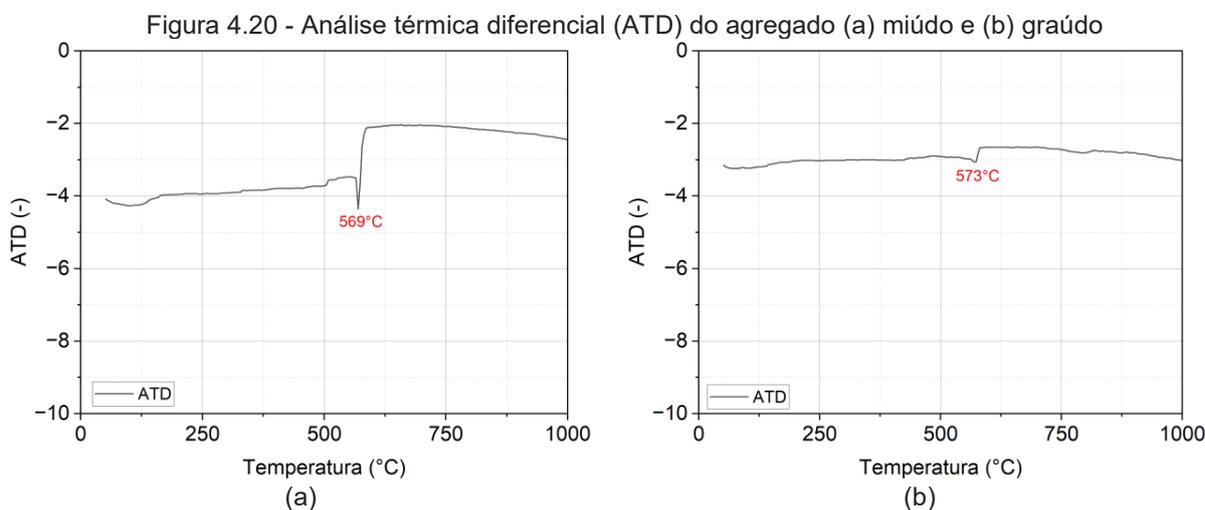
FONTE: Autoria própria



Da análise dos demais resultados apresentados, pode-se concluir que os agregados selecionados apresentam características físicas adequadas à produção de concreto. Os agregados também foram submetidos ao ensaio de termogravimetria (ATG) e análise térmica diferencial (ATD), e os resultados são apresentados na Figura 4.19 e Figura 4.20, respectivamente.



Fonte: Autoria própria



Fonte: Autoria própria

Na TG de ambos agregados é possível observar uma baixa perda de massa próxima à 100°C, aquela relacionada à umidade residual das amostras. Tanto o agregado graúdo quanto o miúdo não apresentaram nenhuma perda de massa entre 400 e 600°C, relacionada a fases básicas (brucita, dolomita ou portlandita), nem presença de carbonados (calcita) com

perda de massa característica acima de 600°C – resultando em uma baixa perda ao fogo (RAMACHANDRAN et al., 2002).

No ensaio ATD, ambos agregados apresentaram pico endotérmico próximo a 570°C, com maior intensidade no agregado miúdo e menor intensidade no gráudo, devido à presença de quartzo de baixa temperatura. Gomes, Furtado e Souza (2018) explicam que, de acordo com o diagrama de fase dos polimorfos da sílica, o quartzo trigonal (α -quartzo) transforma-se em β -quartzo a 573°C, com estrutura hexagonal e aumento do ângulo Si-O-Si. Assim, comprova-se a presença da fase mineral quartzo nas amostras. Não foi possível a identificação de fases de outros polimorfos do quartzo, como a cristobalita. Na Figura 4.21 e na Figura 4.22 são apresentados os difratogramas dos agregados, com identificação dos principais picos.

Figura 4.21 - Identificação de fases cristalinas por DRX no agregado miúdo

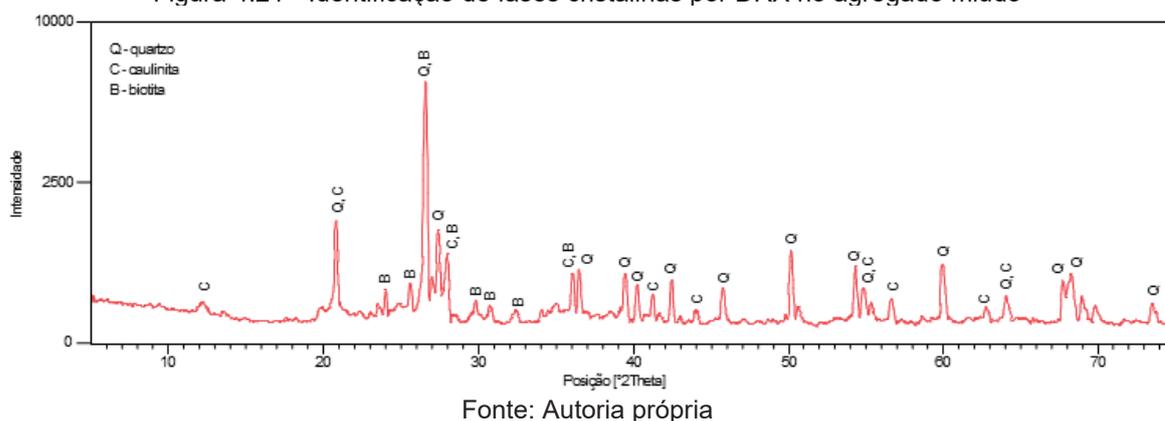
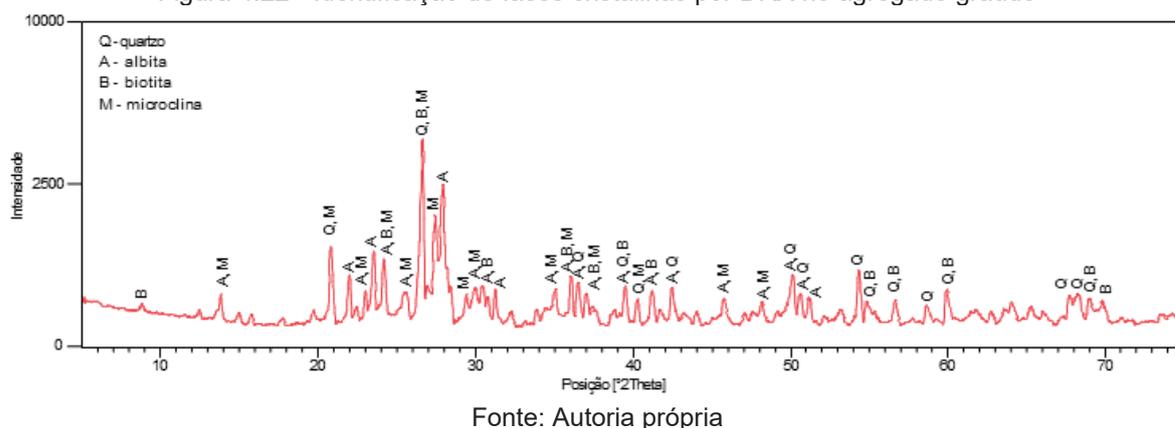


Figura 4.22 - Identificação de fases cristalinas por DRX no agregado gráudo



No agregado miúdo foi possível identificar a presença de quartzo com picos bem definidos e de alta intensidade, além de presença, em menor intensidade, de picos relativos à caulinita (proveniente de contaminação de argilominerais do solo) e biotita (um silicato do

grupo das micas). A caracterização do agregado miúdo é coerente com o encontrado em areia natural obtida em cava de rio (MELO et al., 2002). No agregado graúdo, as fases minerais encontradas são típicas de rochas metamórficas gnaiss, com presença de quartzo, minerais do grupo dos feldspatos (albita e microclina) e do grupo das micas (biotita).

É importante ressaltar que a técnica de DRX pode apresentar algumas limitações na identificação de fases minerais presentes em menor teor, bem como de fases metaestáveis e parcialmente amorfas. Essas fases são mais susceptíveis à RAS, e podem exigir processos de glicolagem e calcinação para a correta identificação de alguns argilominerais.

Desta forma, a análise petrográfica possui maior confiabilidade para a identificação de minerais reativos por permitir a verificação de: incrustações, minerais deformados, presença ângulo de extinção ondulante e formação de subgrãos (TIECHER, 2010), não observáveis pelo ensaio de DRX. Por este motivo, foi realizado o ensaio de petrografia nas lâminas delgadas preparadas com amostras extraídas da jazida. As fotomicrografias com identificação dos minerais das amostras R1, R2 e R3 podem ser observadas nas Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25, respectivamente.

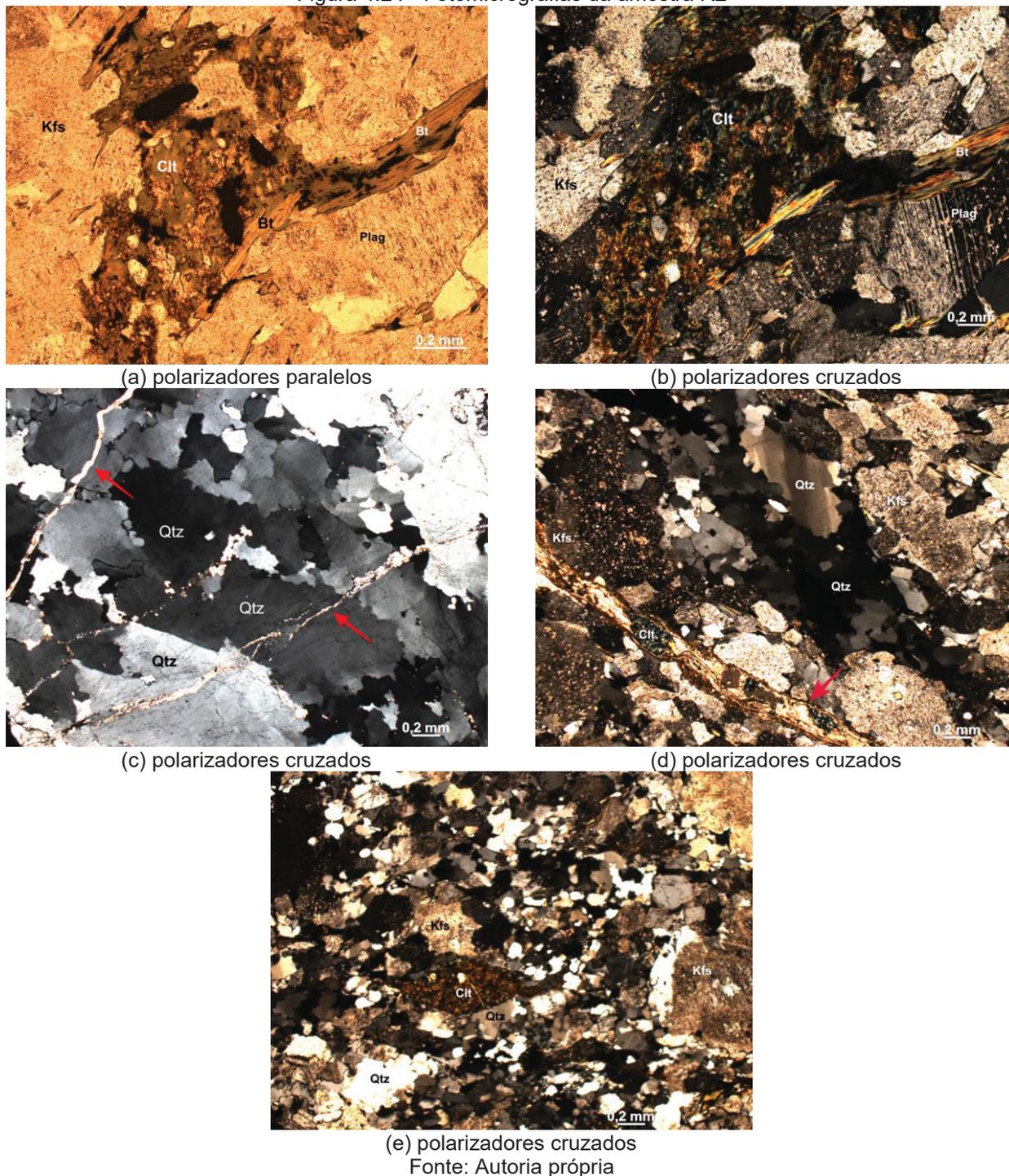
Figura 4.23 - Fotomicrografia da amostra R1, com polarizadores cruzados



Fonte: Autoria própria

A fotomicrografia da amostra R1 apresentada na Figura 4.23 demonstra textura granoblástica em gnaiss, onde predominam cristais xenoblásticos de quartzo (Qtz) com extinção ondulante moderada a intensa, associados a feldspato alcalino (Kfs) e plagioclásio, os últimos sericitizados. A seta vermelha indica fratura preenchida por carbonato.

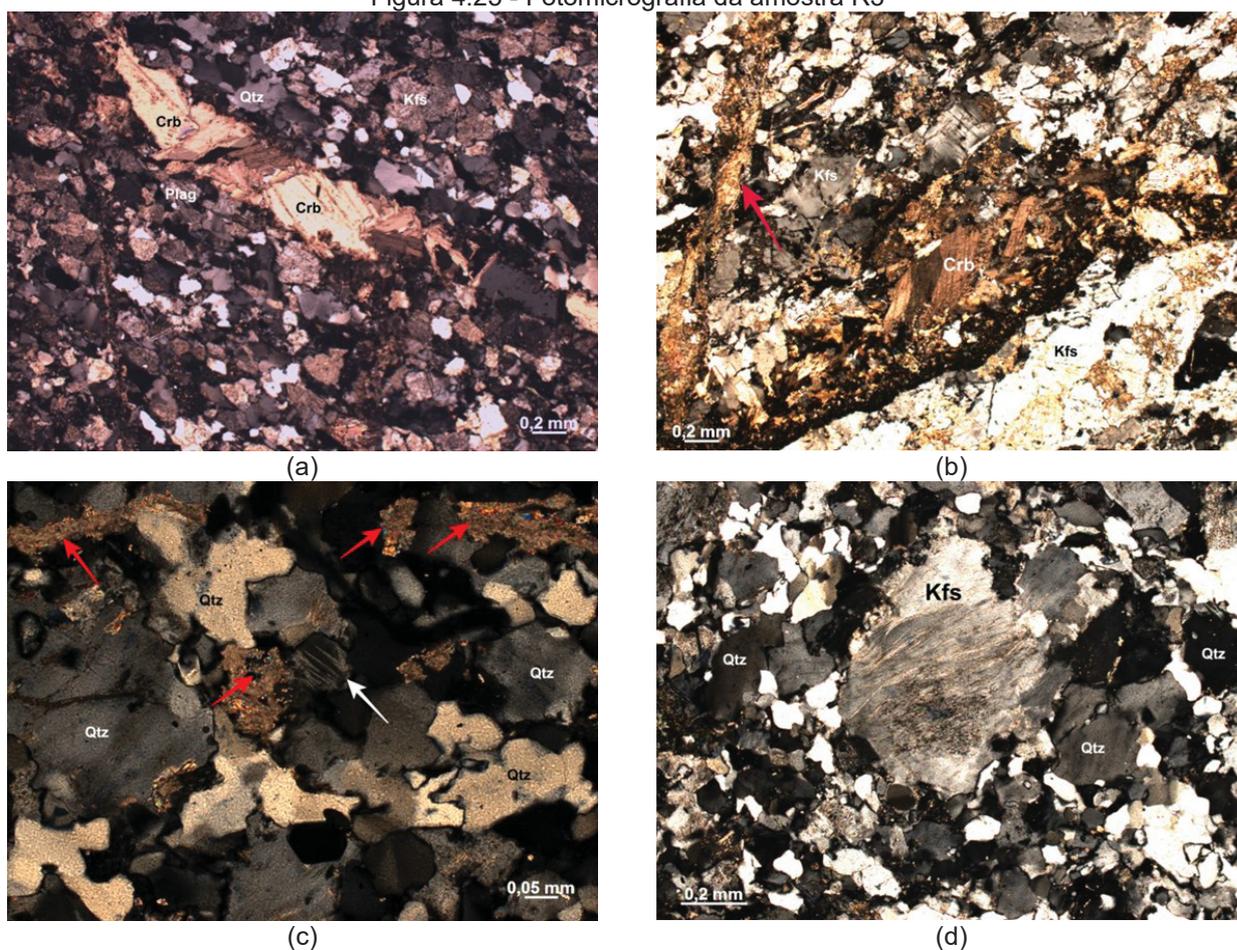
Figura 4.24 - Fotomicrografias da amostra R2

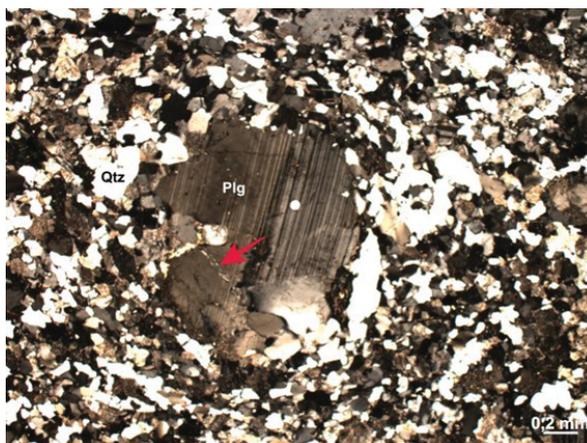


Na Figura 4.24a, é possível a identificação de cristal de biotita (Bt) intensamente alterado para clorita (Clt), tendo ainda como subprodutos da alteração opacos e titanita. Plagioclásio (Plag) e feldspato alcalino (Kfs) em cristais subidioblásticos encontram-se intensamente sericitizados, com aspecto turvo acentuado. Na Figura 4.24b, é apresentada a

mesma fotomicrografia da Figura 4.24a, mas com os polarizadores cruzados. Nota-se a sericitização dos feldspatos, onde, por vezes, há associação com carbonatos. Na Figura 4.24c, ocorre presença de cristais xenoblásticos de quartzo, com contatos suturados entre si e extinção ondulante acentuada. Fraturas preenchidas por carbonato (setas vermelhas) ocorrem tanto seccionando toda a rocha, quanto internamente aos cristais. Na Figura 4.24d, ocorrem cristais de quartzo (Qtz) cominuídos e com extinção ondulante acentuada, associados a feldspato alcalino (Kfs) com intensa sericitização. A seta vermelha indica fratura preenchida por clorita (Clt) e carbonato. Esse último ocorre ainda no preenchimento de microfraturas em feldspato e quartzo. Na Figura 4.24e, observam-se cristais xenoblásticos de quartzo (Qtz) e feldspato alcalino (Kfs), com extinção ondulante e sericitização acentuada. Biotita encontra-se totalmente pseudomorfizada por clorita (Clt).

Figura 4.25 - Fotomicrografia da amostra R3





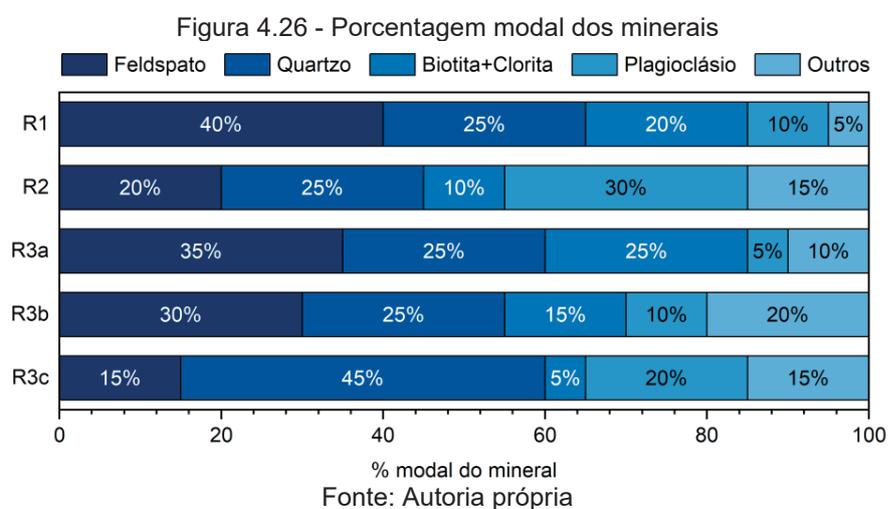
(e)

Fonte: Autoria própria

A fotomicrografia da Figura 4.25a mostra a associação mineral da rocha, constituída por cristais xenoblásticos de quartzo (Qtz), feldspato alcalino (Kfs) e plagioclásio albita - oligoclásio (Plag), os dois últimos intensamente sericitizados. Ocorre, ainda, fratura preenchida por carbonato (Crb) em cristais bem desenvolvidos e límpidos. Na Figura 4.25b, são identificados cristais subidioblásticos a xenoblásticos de feldspato alcalino (Kfs), fraturados e com extinção ondulante e interstícios preenchidos por carbonato e filossilicatos. No centro da imagem observa-se fratura preenchida por carbonato (Crb) e sericita; a seta indica fratura subortogonal à primeira, igualmente com carbonato. Na Figura 4.25c notam-se cristais xenoblásticos de quartzo (Qtz) com extinção ondulante acentuada, associados a feldspato alcalino com pertita em chama (seta branca) e interstícios preenchidos por carbonato (setas vermelhas). Na Figura 4.25d, ocorre presença de porfiroblasto de feldspato alcalino (Kfs) com pertita do tipo chama, associado a cristais xenoblásticos de quartzo (Qtz) com acentuada extinção ondulante. Por fim, na 4.20e, observa-se porfiroblasto subidioblásticos de plagioclásio albita - oligoclásio (Plag) associado a matriz constituída por cristais de quartzo (Qtz) xenoblásticos e com extinção ondulante moderada a intensa. A seta indica presença de fratura preenchida por carbonato e sericita.

Assim, a partir da identificação de minerais pelo ensaio de petrografia, a análise demonstra a predominância de textura granoblástica que ocorre em rochas formadas essencialmente por minerais equidimensionais que se agregam uns aos outros sem conferir a rocha orientação preferencial, com destaque para o quartzo microcristalino. Este fato induz que os minerais apresentem forma diferente da normal ou esperada (cristais xenoblásticos), em especial no quartzo que apresentou grande alteração devido a extinção ondulante elevada

– gerado por esforços compressíveis na rocha durante a formação geológica da região (BUCHER; GRAPES, 2011). A presença de feldspato alcalino, com predominância de silicatos de sódio e de potássio, reforça a contribuição de íons alcalinos para o desenvolvimento da RAS, conforme verificado na composição química dos agregados (Tabela 4.10). As fraturas preenchidas por carbonatos foram possivelmente provocadas pela penetração de fluidos hidrotermais nas rochas encaixantes, também acelerando a alteração da rocha e facilitando o ingresso de minerais sedimentares como carbonatos. A biotita, que pertence ao grupo das micas, também apresentou alteração microestrutural para clorita devido ao contato com fluídos intersticiais- reforçando o grau de alteração do gnaiss avaliado. E a presença de porfiroblastos, grande cristal mineral que cresceu dentro da matriz de granulação mais fina, também indica recristalização mineral devido a alterações na rocha (FEININGER, 2007). A fichas da descrição petrográfica podem ser consultadas no APÊNDICE B. A Figura 4.26 apresenta a porcentagem modal dos minerais estimada visualmente durante a análise petrográfica.

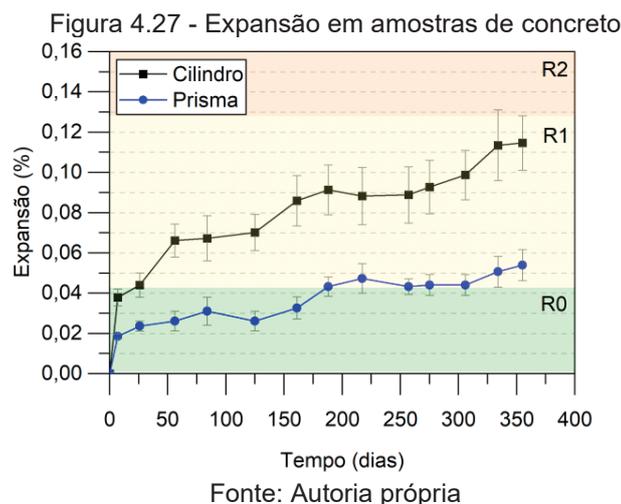


Desta forma, considerando a NBR 15577-3 (ABNT, 2018c), todas as amostras podem ser classificadas como reativas devido à presença de quartzo deformado acima de 5%. Contudo, a reatividade da rocha é reforçada pela grande alteração microestrutural das fases minerais e presença de fraturas na rocha - comportamento compatível com a formação geológica da região (gnaisses bandados). A região da saibreira encontra-se sobre uma falha entre duas unidades litoestratigráficas, facilitando a alteração de rochas metamórficas, que compõe 38% da crosta da América do Sul (FERNANDES et al., 2016). Prado (2008) verificou

que maior é o potencial reativo de rochas, quanto mais próximas da região de falha geológica. Estas regiões, segundo o autor, devido a alterações de temperatura e pressão durante a formação da crosta terrestre geram rochas metamórficas com características de deformação, como intensa recristalização de quartzo, desenvolvimento de sub-grãos, bandas de deformação e extinção ondulante.

4.3.2 Expansão em concreto conforme NBR 15577-6

A partir das leituras mensais de expansão dos prismas e cilindros de concreto com pinos, foi possível confirmar o potencial reativo do agregado graúdo. Os resultados das leituras podem ser observados na Figura 4.27, que apresenta também a classificação do grau de reatividade conforme a Tabela 4.3.



A partir dos resultados apresentados na Figura 4.27, é possível observar que para as duas geometrias e após 365 dias de ensaio, o agregado pode ser classificado como potencialmente reativo de grau R1.

Após 365 dias, as amostras cilíndricas atingiram um valor de expansão de 0,114% e as amostras prismáticas 0,053% de expansão. Assim, o uso de amostras cilíndricas gerou um aumento de 113% nas expansões observadas. Foi realizada comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$), e foi possível confirmar que existem diferenças estatisticamente significativas entre os resultados de expansão nas diferentes geometrias. A variação obtida nos resultados de amostras cilíndricas foi superior ao encontrado para as amostras

prismáticas, e isto pode ser observado nas maiores barras de erro apresentadas na Figura 4.27. Esse fato pode estar atrelado à lixiviação de álcalis das amostras e orientação da concretagem que ocorre de forma diferente em amostras com geometrias diferentes.

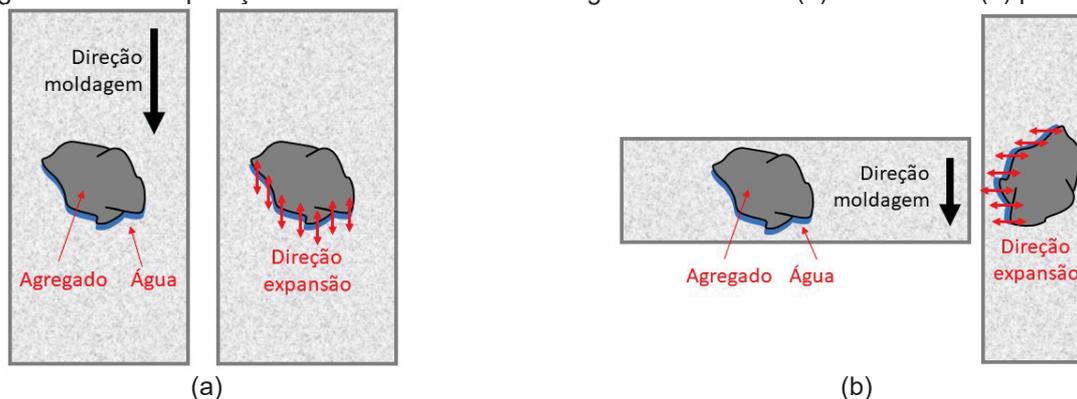
Expansões superiores em amostras cilíndricas quando comparadas a amostras prismáticas já foram observadas para diferentes condições: aumento de 40% em câmara úmida, 100% quando submersa e 120% nas amostras seladas (MULTON et al., 2008). Langaro (2023) avaliou agregados graúdos coletados da mesma jazida e obteve no ensaio em concreto expansões de 0,05% (valor 5% inferior) em amostras prismáticas e 0,17% (valor 49% superior) em amostras cilíndricas – corroborando a variação nas leituras de expansão.

A lixiviação exerce influência nas variações observadas para as diferentes geometrias devido à solubilização álcalis pela umidade condensada na superfície das amostras (RIVARD et al., 2003). Assim, a lixiviação aumenta com a redução da seção transversal das amostras (COSTA; MANGIALARDI; PAOLINI, 2017; LINDGÅRD et al., 2013). Sinno e Shehata (2019) demonstraram que prismas tiveram o dobro de lixiviação de álcalis quando comparado à cilindros, associado à redução entre 15% e 20% na expansão.

Diab, Soliman, Nokken (2021) observaram aos 28 dias que amostras cilíndricas contendo sílica ativa apresentam expansões até 43% superiores às amostras prismáticas, enquanto aos 365 dias esta proporção foi reduzida para 10%. Os autores discutem possíveis efeitos da direção da moldagem e taxa de lixiviação diferentes para as duas geometrias. Smaoui et al. (2004) comprovaram que a expansão da RAS é afetada pela geometria, direção de lançamento do concreto e tipo de adensamento, sendo que a variação da geometria do concreto (prisma para cilindro), associada ao adensamento em diferentes direções, gerou aumento de 1,63 a 2,13 vezes nos resultados de expansão de cilindros avaliados pelos autores. Este resultado é coerente com o aumento de 2,13 vezes na expansão observada nesta tese.

Sabe-se que a fissuração durante a RAS ocorre preferencialmente na direção perpendicular ao lançamento do concreto no molde, devido ao acúmulo de água sob os agregados. Devido à anisotropia do concreto, gerada durante o processo de moldagem e vibração, existe uma diferença nos resultados das amostras prismáticas moldadas na horizontal, e amostras cilíndricas moldadas na vertical (LARIVE; LAPLAUD; COUSSY, 2000). Esse fato é ilustrado na Figura 4.28, na qual são indicadas a direção da moldagem e a direção em que ocorre a expansão devido ao acúmulo de água.

Figura 4.28 - Comparação do efeito de acúmulo de água em amostras (a) cilíndricas e (b) prismáticas

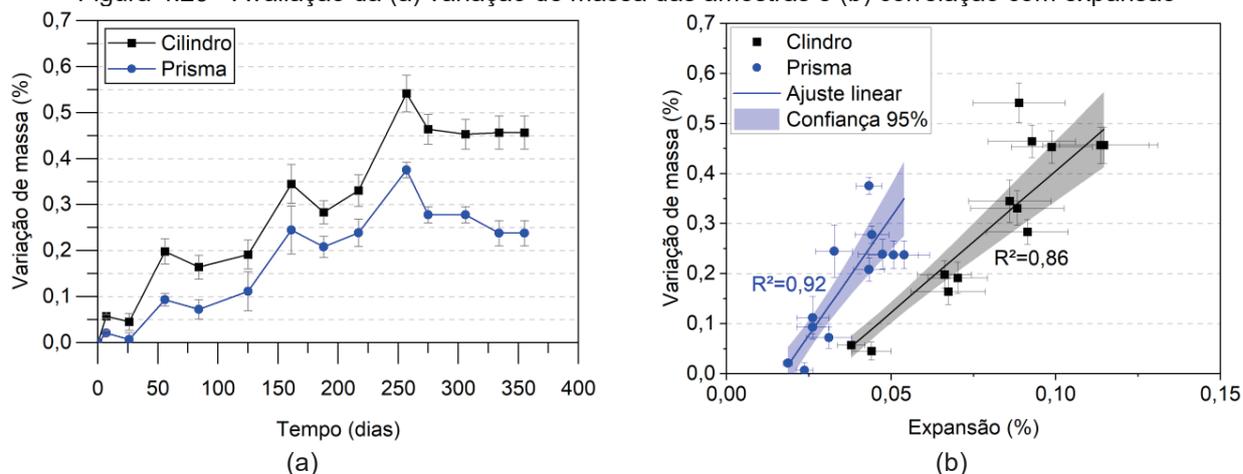


Fonte: Autoria própria

Cabe ressaltar que diversos estudos em concreto afetado por RAS são realizados apenas em amostras cilíndricas (BEZERRA; TROTTIER; SANCHEZ, 2022; FRARE et al., 2022; GIANNINI et al., 2018; MACIOSKI et al., 2021; NOËL; SANCHEZ; TAWIL, 2018; REAIEZH, 2022; SANCHEZ et al., 2016b, 2014a, 2014b, 2015b, 2015a, 2016a, 2017a, 2017b; SANCHEZ; DRIMALAS; FOURNIER, 2020; SOUZA, 2022; TROTTIER, 2020). Destaca-se, portanto, a necessidade controle da lixiviação das amostras durante a realização de ensaios para avaliação da RAS.

Após cada leitura de expansão, foi realizada também a medida da variação da massa das amostras (Figura 4.29a) e verificada sua correlação com a expansão (Figura 4.29b) por meio de um ajuste linear e indicação do intervalo de 95% de confiança.

Figura 4.29 - Avaliação da (a) variação de massa das amostras e (b) correlação com expansão



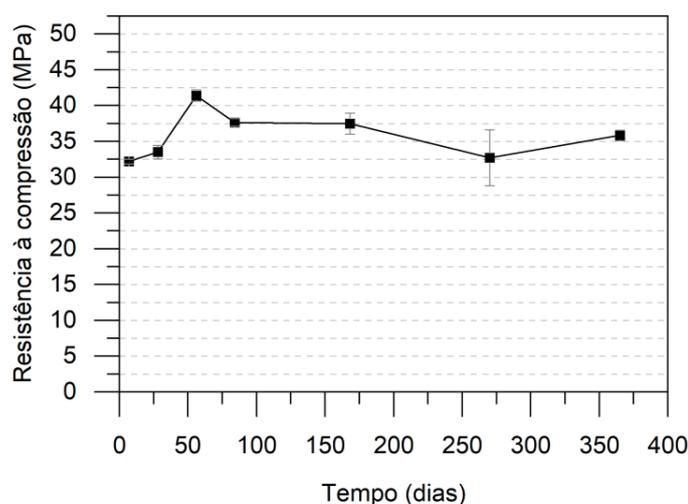
Fonte: Autoria própria

Observa-se que ocorreu uma maior variação de massa nas amostras cilíndricas, reforçando um nível mais elevado de expansão nesta geometria de amostra. O aumento da massa das amostras está relacionado ao grau de fissuração, com conseqüente penetração de umidade e sua combinação química para a formação de gel RAS. Comportamento semelhante foi observado por Langaro (2023) que verificou ganhos de massa de 0,85 a 1,0% em amostras de concreto avaliadas com agregados da mesma jazida.

4.3.3 Ensaio para avaliação de dano por RAS

Para auxiliar na avaliação dos efeitos da RAS no concreto, foram realizados ensaios de resistência à compressão e de porosidade nas amostras cilíndricas, e os resultados podem ser observados na Figura 4.30 e Figura 4.31, respectivamente.

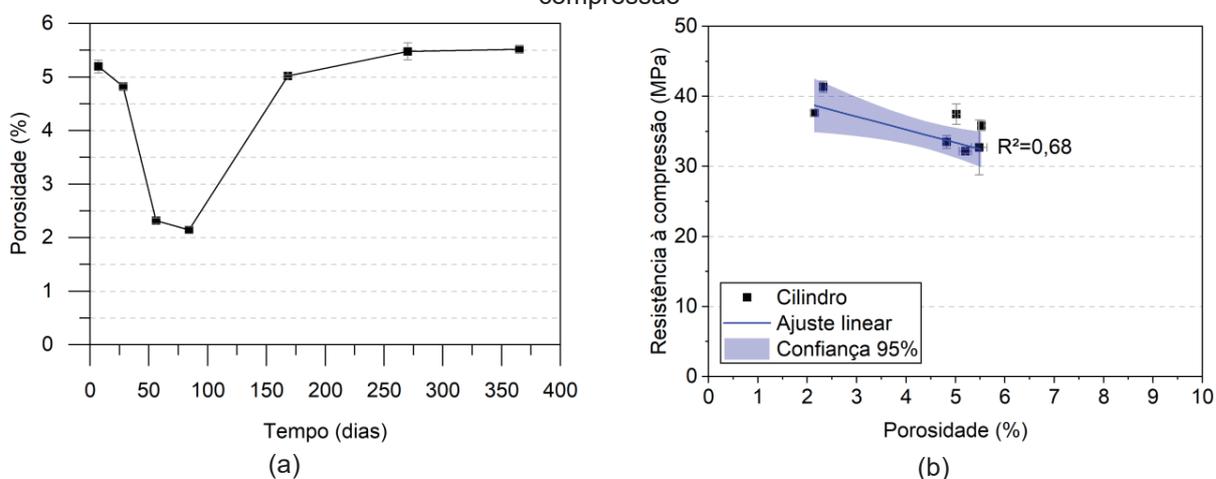
Figura 4.30 - Variação da resistência à compressão ao longo do tempo



Fonte: Autoria própria

Considerando os resultados apresentados, é possível observar uma tendência de aumento da resistência mecânica das amostras, acompanhado pela redução na porosidade total das amostras até a idade de 56 dias. Este comportamento pode ser associado ao processo de hidratação do cimento Portland e cura térmica que passou a ocorrer dentro da câmara. Até esta idade, as amostras cilíndricas apresentaram expansão de 0,06%, mas com fissuração apenas nos agregados, como será discutido na apresentação dos resultados do ensaio DRI.

Figura 4.31 - Porosidade das amostras cilíndricas (a) ao longo do tempo e (b) correlação com a resistência à compressão



Fonte: Autoria própria

Após 100 dias ocorreu um aumento da porosidade até a idade de 365 dias, também acompanhado de tendência de redução na resistência à compressão do concreto. Neste período, entende-se que ocorreu o avanço da RAS com aumento do número de fissuras e descontinuidades na amostra. Foi possível identificar ainda uma boa correlação ($R^2 > 90\%$) entre a resistência à compressão e porosidade das amostras, ainda que a porosidade medida esteja relacionada à abertura de fissuras e não aos vazios gerados no processo de hidratação do cimento Portland.

Contudo, após realizar o teste de Tukey ($\alpha=0,05$), ao comparar os resultados de resistência e porosidade, não é possível afirmar que a amostra apresentou variações significativas nas propriedades entre 28 dias e 365 dias. Variações significativas são observadas apenas para a porosidade nas idades de 56 e 84 dias (Figura 4.31a). Portanto, a RAS não gerou alterações significativas nas propriedades (porosidade e resistência) das amostras até a idade de 365 dias. Hasparyk (2022a) explica que, apesar da resistência à compressão ser uma propriedade importante do concreto, ela não é o melhor parâmetro para se avaliar a RAS. Isto porque a propriedade pode sofrer aumento, dependendo do estágio da reação, em virtude do grande volume de produtos formados no interior de fissuras. Esses produtos têm a capacidade de colmatar poros, e pode indicar um valor não apropriado para o nível de deterioração do material. Pereira et al. (2023) comprovaram o ganho de resistência à compressão em amostras afetadas por RAS, e verificaram por ensaio de porosimetria de intrusão de mercúrio que ocorre um refinamento da zona de transição dos agregados devido à formação do gel ao seu redor.

No ensaio *Stiffness Damage Test* (SDT), realizado conforme trabalho de Sanchez et al. (2017), foi possível verificar a progressão das deformações plásticas nas amostras, bem como da histerese gerada ao longo dos ciclos de carregamento na amostra, como pode ser observado na Figura 4.32. Não foi possível a análise dos resultados do ensaio SDT nas idades de 6 e 9 meses devido a falhas na aquisição da deformação específica pelos extensômetros LVDT.

A partir dos resultados obtidos no ensaio SDT, foi possível realizar o cálculo do Índice de deformação plástica (PDI ou *Plastic Deformation Index*) e do Índice de Dano de rigidez (SDI ou *Stiffness Damage Index*), conforme as Equações 4.5 e 4.6. Os resultados são apresentados na Figura 4.33.

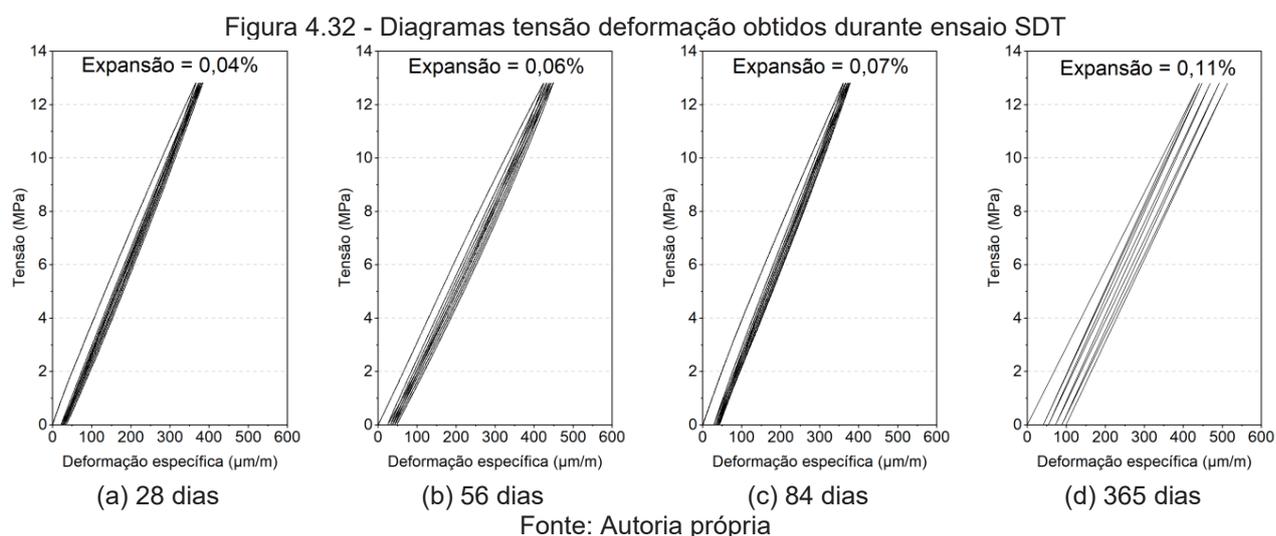
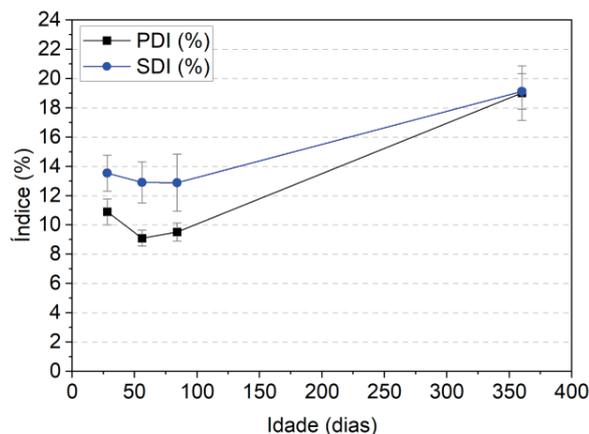
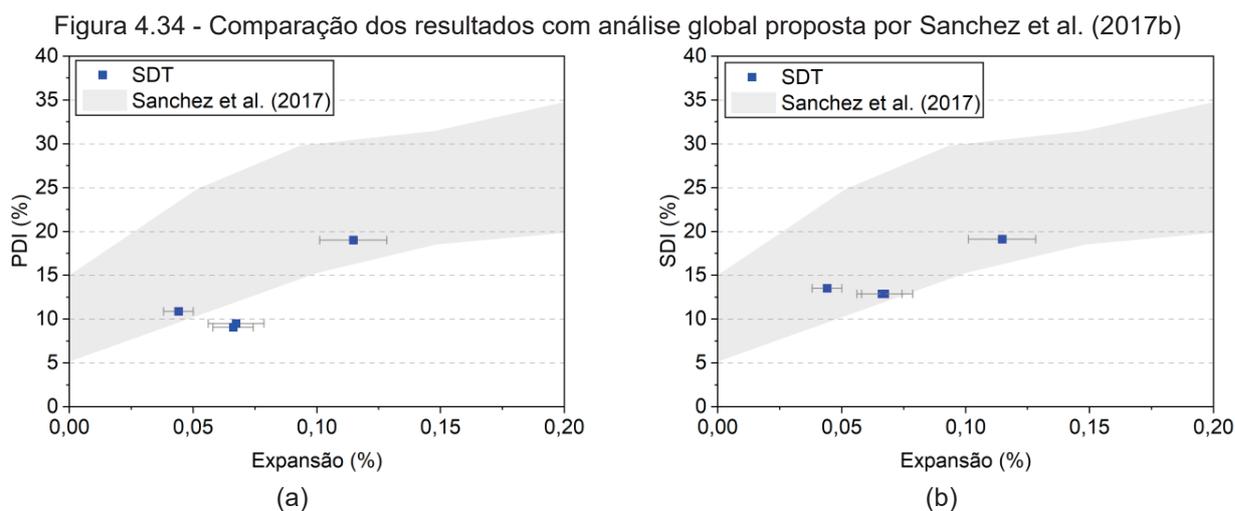


Figura 4.33 - Parâmetros SDT e PDI obtidos no ensaio SDT



A partir dos índices obtidos das curvas tensão-deformação no ensaio SDT, observa-se uma redução do parâmetro PDI nas idades iniciais até 84 dias (Figura 4.33), que pode estar relacionada ao aumento da resistência à compressão (Figura 4.30) e redução da porosidade (Figura 4.31), causando um aumento da rigidez do concreto – conforme discutido anteriormente. Para o parâmetro SDI não houve variação estatisticamente significativa nas idades iniciais. Após esta idade até 365 dias ocorreu um aumento significativo da deformação plástica e da área de histerese, com consequente aumento do PDI e SDI, ambos índices atingindo 19% ao final e 365 dias de ensaio.

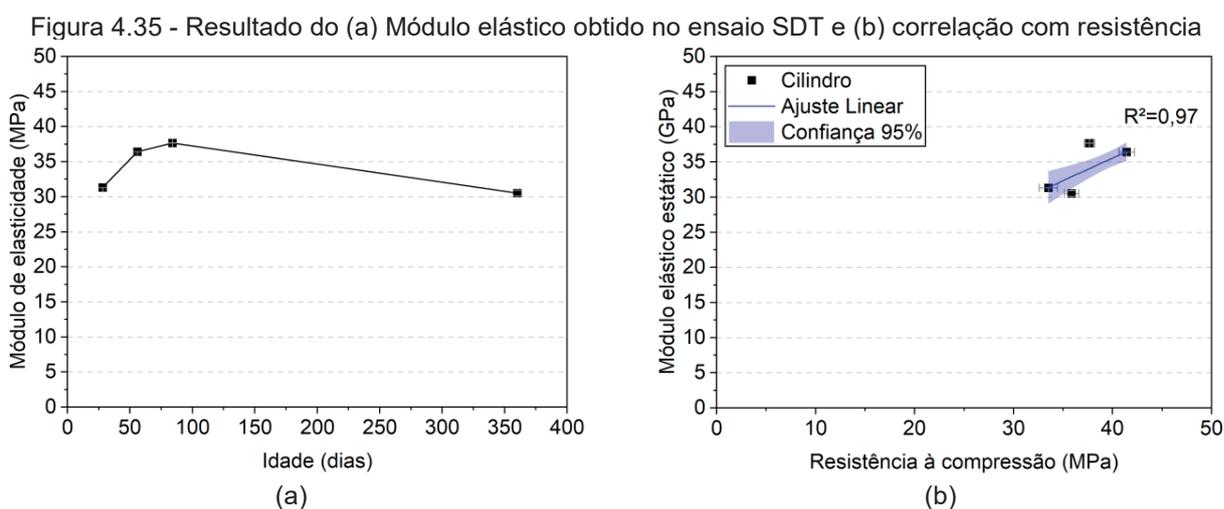
Com o intuito de se verificar a compatibilidade dos resultados obtidos com a degradação das amostras, os valores de PDI e SDI obtidos em função do grau de expansão das amostras foram comparados com os resultados obtidos por Sanchez et al. (2017b), em cilindros, com base nos dados apresentados anteriormente na Tabela 4.5.



A partir da análise da Figura 4.34, pode-se observar que os resultados obtidos se encontram próximos ao limite inferior proposto pelos autores para a análise global de concretos afetados por RAS. Esse resultado é esperado, tendo em vista o menor potencial de expansão das amostras aos 365 dias quando comparado aos agregados de alta reatividade utilizados por Sanchez et al. (2017b), e a utilização de agregados de origem brasileira - que podem apresentar comportamento distinto daqueles utilizados no estudo. Contudo, confirma-se que a análise multiparâmetro proposta é coerente para o diagnóstico de estruturas existentes por meio do ensaio SDT.

Langaro (2023) avaliou agregados da mesma jazida e obteve valores de PDI de 15% e SDI de 10% aos 365 dias, valores inferiores aos verificados nesta tese. Souza (2022) verificou em agregados de alta reatividade valores de SDI entre 14% e 22% quando as amostras de concreto (com e sem adições minerais) apresentaram expansões de 0,12%. Já Reaiezh (2022) extraiu testemunhos de blocos que apresentaram expansão de 0,15% e verificou nestas amostras valores de SDI médio de 22 a 27%. Assim, os resultados obtidos no agregado brasileiro são coerentes com os estudos realizados com agregados de outros países.

Nota-se, ainda, que o ajuste linear obtido apresenta coeficiente angular semelhante ao intervalo proposto por Sanchez et al. (2017b). Na Figura 4.35 pode-se observar os resultados obtidos para o módulo elástico das amostras.

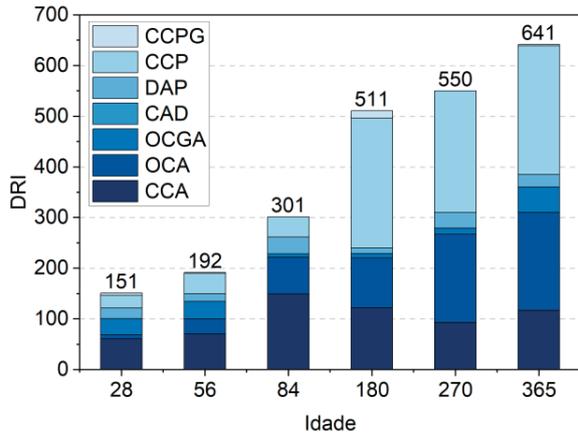


Fonte: Autoria própria

Em relação ao módulo elástico dos concretos (Figura 4.35a), nota-se comportamento semelhante ao PDI e SDI, com melhoria da propriedade nas idades iniciais até 84 dias e redução ao final de 1 ano de ensaio. Após teste de Tukey ($\alpha=0,05$), observou-se diferença estatisticamente significativa no módulo elástico entre 28 e 365 dias, com redução média de 2,5% na propriedade. Foi possível encontrar uma boa correlação (>90%) entre o módulo elástico e a resistência à compressão, conforme apresentado na Figura 4.35b.

Ainda para o diagnóstico das amostras, foi realizado o ensaio *Damage Rating Index* (DRI), baseado na quantificação e classificação das fissuras (Tabela 4.8) nas amostras ao longo do tempo, possibilitando ainda o cálculo do índice de dano geral e compreensão do avanço da reação nas amostras de concreto, conforme apresentado na Figura 4.36.

Figura 4.36 - Índice de dano e classificação de fissuras no ensaio DRI



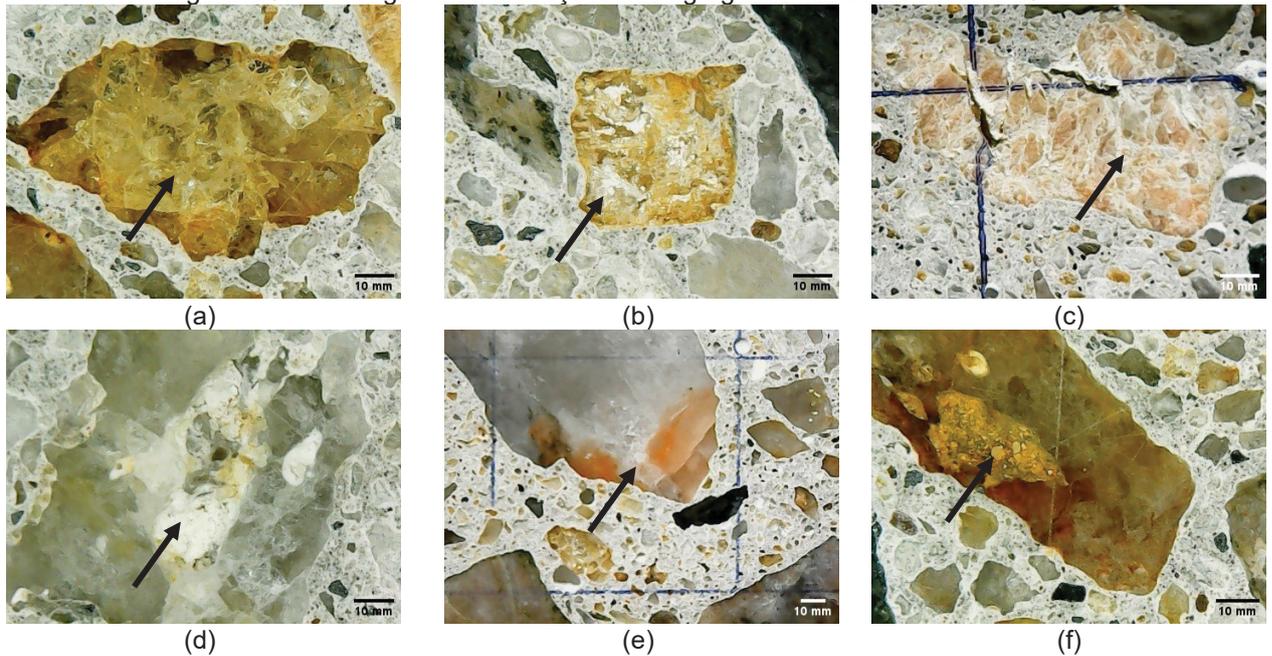
Legenda:

- CCA** - Fissura no agregado graúdo
- OCA** - Fissura aberta no agregado graúdo
- OCGA** - Fissura preenchida no agregado graúdo
- DAP** - Partícula de agregado desagregada
- CAD** - Descolamento do agregado graúdo
- CCP** - Fissura na pasta de cimento
- CCPG** - Fissura preenchida na pasta de cimento

Fonte: Autoria própria

Considerando a contribuição de cada tipo de fissura na amostra, observa-se que aos 28 dias a amostra já apresenta algum grau de fissuração (DRI=151). Este comportamento está relacionado ao uso de rocha metamórfica tipo gnaisse com alto grau de alteração, com agregados apresentando mudança na textura da rocha (Figura 4.37a e Figura 4.37b), fissuração generalizada (Figura 4.37c), vazios dentro dos grãos (Figura 4.37d), agregados compostos por diferentes minerais (Figura 4.37e) e cristalização de novos minerais nos grãos (Figura 4.37f e Figura 4.37g).

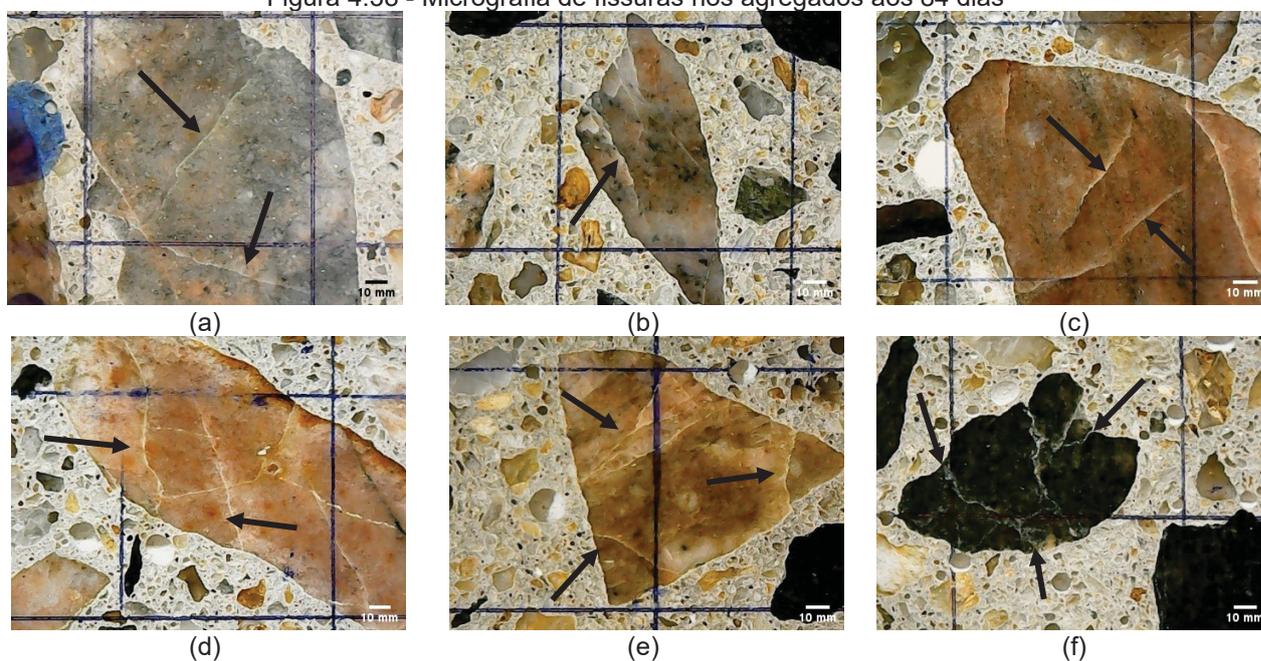
Figura 4.37 - Micrografia de alterações nos agregados nas amostras aos 28 dias



Fonte: Autoria própria

Estes agregados apresentavam elevado número de fissuras mesmo em idades iniciais, permitindo a classificação da partícula de agregado como desagregada/corroída (Dag), condição que se manteve ao longo de todas as idades do ensaio. Até os 84 dias, quando as amostras de concreto apresentaram expansões na ordem de 0,06%, ocorreu avanço apenas nas fissuras interna dos agregados (Figura 4.38), com aumento de fissuras fechadas (FFAg) e surgimento de fissuras abertas (FAAg) devido ao avanço da reação interna dos agregados, elevando o índice de dano (DRI=301).

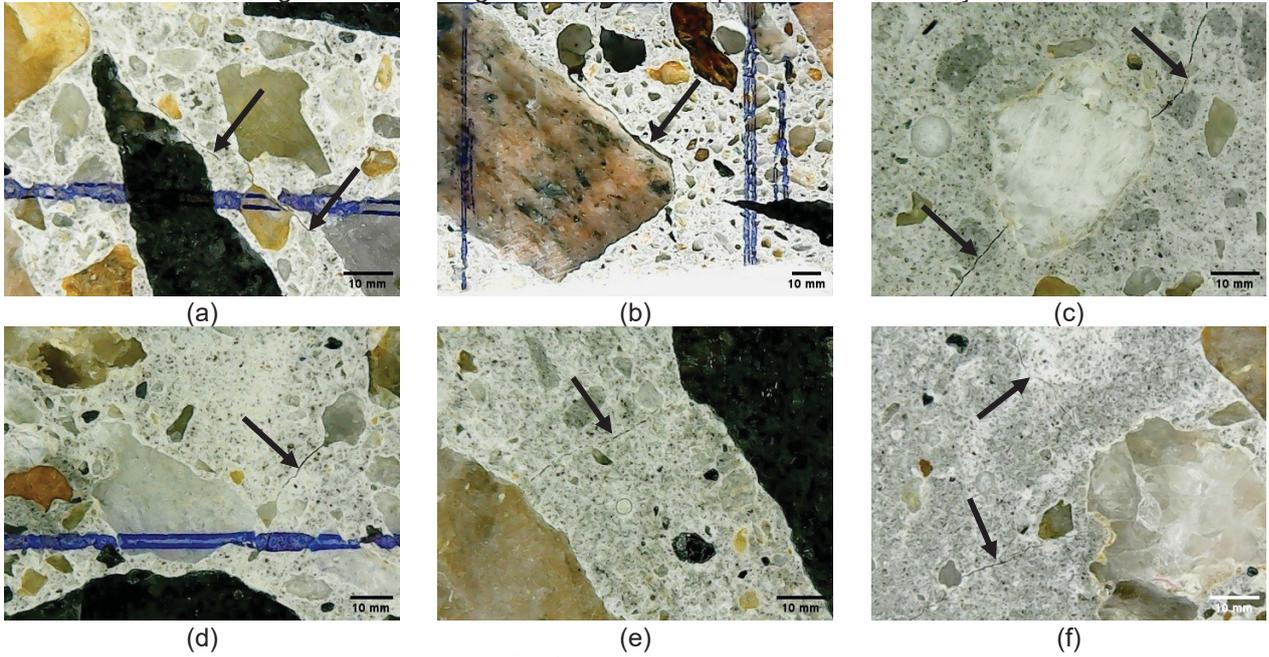
Figura 4.38 - Micrografia de fissuras nos agregados aos 84 dias



Fonte: Autoria própria

Na Figura 4.39 é possível observar que, a partir dos 180 dias de ensaio, ocorreu uma redução do número de fissuras fechadas e aumento de fissuras abertas. A partir dessa idade foi possível observar também o surgimento de fissuras na pasta (Fp) que se iniciaram nas bordas dos agregados (Figura 4.39a e Figura 4.39b) e, com o avanço da idade das amostras, passavam a conectar agregados (Figura 4.39c, Figura 4.39d, Figura 4.39e e Figura 4.39f).

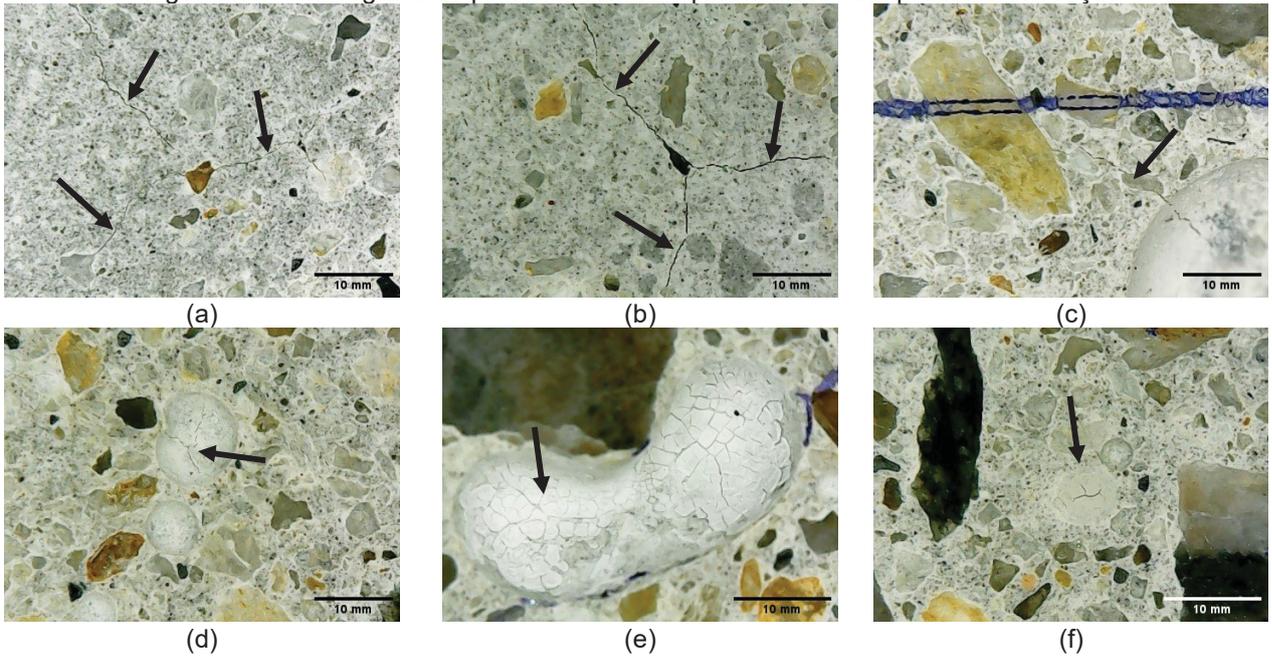
Figura 4.39 - Micrografia de fissuras na pasta em idade avançada



Fonte: Autoria própria

Aos 365 dias, idade em que as últimas leituras foram realizadas, foi possível verificar o avanço das fissuras na pasta também. Nessa idade também foi possível observar fissuras se interconectando (Figura 4.40a e Figura 4.40b) e cruzando poros (Figura 4.40c) que também apresentavam fissuras dentro de sua concavidade (Figura 4.40d).

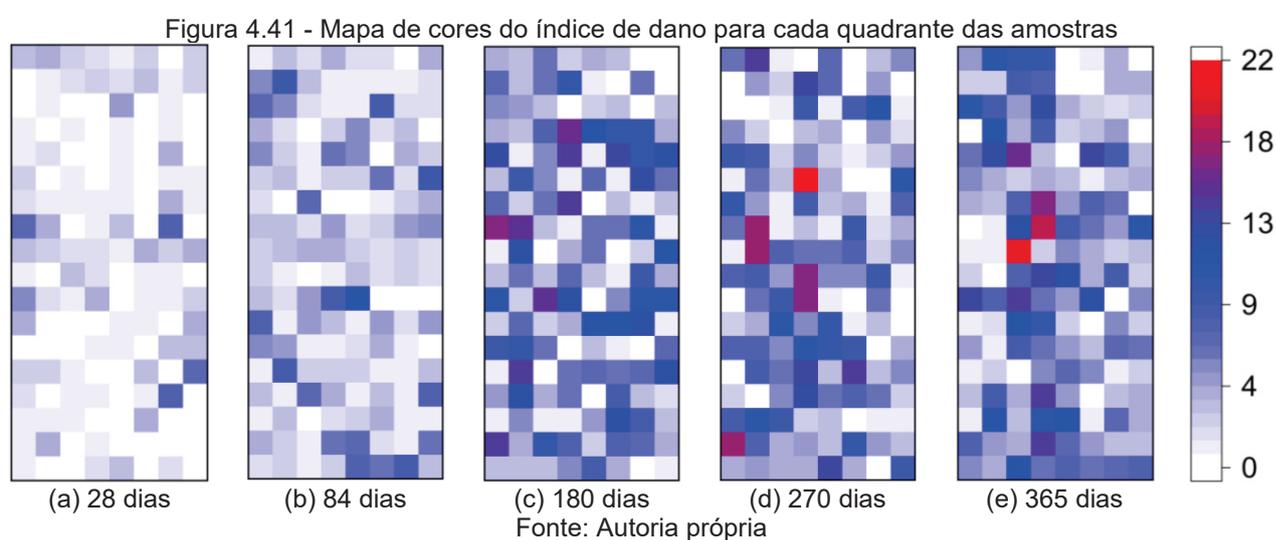
Figura 4.40 - Micrografia de poros fissurados e preenchidos com produtos de reação



Fonte: Autoria própria

Ademais, foi possível observar a precipitação de um material esbranquiçado com fissura mapeada dentro de poros, supostamente o gel RAS (Figura 4.40d e Figura 4.40e). Assim, fica claro como o ensaio DRI pode auxiliar na compreensão do avanço da reação, caracterização de quais agregados apresentam maior reatividade e possibilitar a identificação de produtos de reação, mesmo após corte e polimento das amostras.

Para melhor visualização da progressão do dano nas amostras avaliada pelo ensaio DRI, foi elaborado o mapa de cores apresentado na Figura 4.41 que representa o índice de dano (contagem de fissuras multiplicado pelos fatores de ponderação) para cada quadrante das amostras ao longo das idades de ensaio.



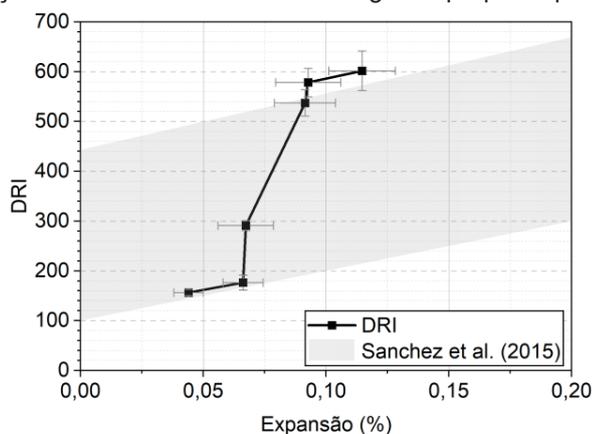
Pode-se observar na Figura 4.41, que a evolução do grau de fissuração é progressiva em toda a amostra, e em idades avançadas os maiores danos costumam ocorrer na parte central das amostras. Este comportamento pode estar relacionado à menor lixiviação de álcalis, conforme já discutido anteriormente. Neste sentido, a instrumentação de cilindros de concreto em seu terço médio poderia reduzir a variabilidade das leituras nos quadrantes próximos às extremidades do cilindro.

De acordo com Reinhardt e Mielich (2011), existem dois diferentes mecanismos de reação propostos para a RAS. O primeiro mecanismo sugere que o processo de dissolução ocorre nas superfícies das partículas de agregado, e as fissuras se formam na zona de transição, atingindo a pasta de cimento devido às pressões de inchamento. A segunda abordagem afirma que as fissuras se formam no interior das partículas de agregado como resultado da formação de bolsas de gel, atingindo a pasta de cimento apenas quando são

alcançados níveis de expansão mais elevados. No caso do agregado avaliado nesta pesquisa, o segundo tipo de mecanismo parece descrever melhor o processo de fissuração da amostra pois, a partir da análise dos resultados do DRI, a progressão da reação em amostras de concreto é bem definida pela abertura de fissuras nos agregados, seguida pelo preenchimento com produto e posterior avanço para a pasta. Com o elevado grau de fissuração, ocorre a interconexão das fissuras através de agregados fissurados e poros preenchidos por produto de reação, conforme ilustrado na Figura 4.4 e previamente observado nas micrografias da Figura 4.37, Figura 4.38, Figura 4.39 e Figura 4.40.

Considerando a correlação entre expansão e índice de dano proposto por Sanchez et al. (2015b), destacado na cor cinza, foi possível observar que nas idades iniciais as amostras se comportaram dentro do esperado com DRI de 151 e expansão de 0,04%. A partir dos 180 dias, ocorreu o avanço do índice de dano (DRI) ainda que as amostras apresentassem expansões inferiores à 0,15%, como pode ser observado na Figura 4.42.

Figura 4.42 - Comparação dos resultados com análise global proposta por Sanchez et al. (2015b)



Fonte: Autoria própria

Ao comparar os resultados obtidos com os encontrados por Sanchez et al. (2015b), é possível notar que o agregado brasileiro utilizado nesta pesquisa apresentou avanço mais acentuado no grau de fissuração das amostras, quando analisado o coeficiente angular do ajuste linear realizado. Este comportamento pode estar relacionado à textura dos grãos e à elevada alteração nos agregados devido à textura lepidoblástica (foliação ao longo de planos), vazios internos e fissuração, conforme apresentado nas micrografias da Figura 4.37. Essas características podem ter facilitado o avanço da reação e acentuaram o dano nas amostras.

Langaro (2023) avaliou agregados da mesma jazida e obteve valores de DRI de 275 aos 28 dias (com 0,01% de expansão) e DRI de 604 aos 365 dias (com 0,17% de expansão); os resultados obtidos pela autora também evidenciam uma maior taxa de dano ao longo do tempo para este tipo de agregado. Souza (2022) verificou em agregados de alta reatividade valores de DRI de 350 a 850 quando as amostras apresentavam 0,12% de expansão. Trottier (2020) verificou índice DRI de 400 em amostras com expansão de 0,12%; e Reaiezh (2022) verificou DRI de 520 a 580 em testemunhos extraídos de blocos após atingirem expansão de 0,15%. Isto posto, a faixa de índice de dano observadas nesta tese são coerentes com a literatura e resultados obtidos com agregados de outros países.

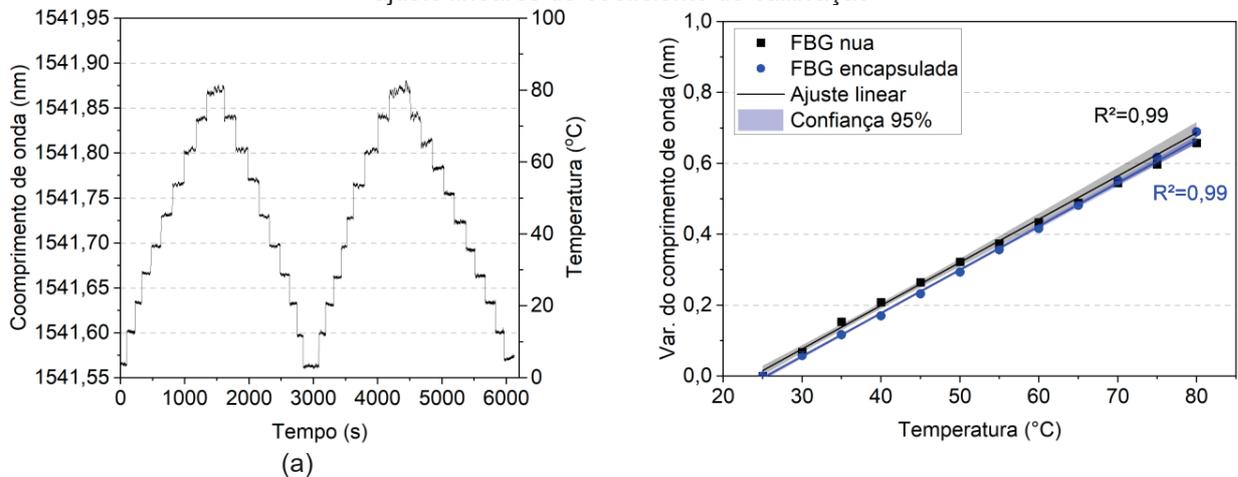
O ensaio DRI demonstra como o concreto pode apresentar um estágio avanço de fissuração interna, ainda que em níveis de expansão de baixo grau (R1). Esta condição reforça a importância da combinação de diferentes técnicas e da avaliação da microestrutura, de forma a compreender a cinética da reação, sua forma de avanço, identificar quais minerais são mais susceptíveis à RAS, bem como verificar o grau de degradação interna do concreto. Este estágio avançado de fissuração facilita a entrada de umidade e consequente aceleração da RAS, além de facilitar a infiltração de outros agentes agressivos, além da carbonatação do concreto.

4.3.4 Monitoramento da RAS com sensor FBG

De forma a garantir o correto monitoramento das amostras de concreto com sensores FBG, foi necessária primeiramente a calibração dos sensores utilizados para compensação térmica. Na Figura 4.43a é possível observar a resposta dos sensores (comprimento de onda) em função da variação da temperatura.

Nota-se que o processo de encapsulamento não ocasionou uma alteração significativa no coeficiente de calibração dos sensores (Figura 4.43b), sendo observado durante a realização dos ensaios apenas atraso de cerca de 10 segundos na resposta do sensor devido à inércia térmica gerada pelo encapsulamento.

Figura 4.43 - Calibração do sensor FBG para temperatura: (a) patamares de aquecimento na FBG nua e (b) ajuste lineares do coeficiente de calibração



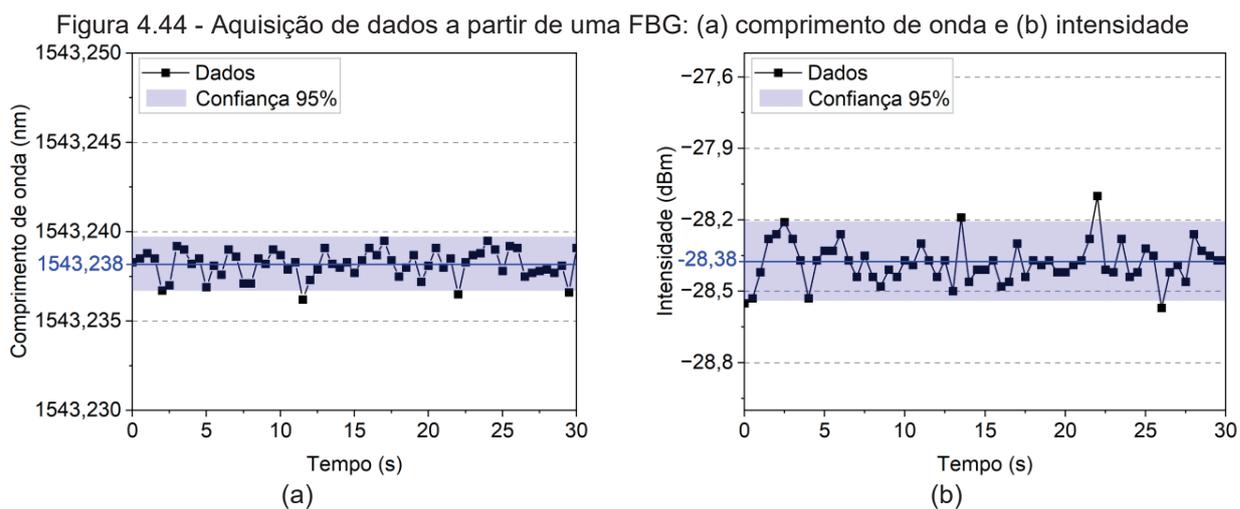
Fonte: Autoria própria

Após a calibração térmica, o sensor FBG com fibra nua e encapsulada apresentaram uma sensibilidade de $12,19 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ e $12,23 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ respectivamente, ambos com R^2 acima de $0,99$. Considerando os erros observados, esta variação não é estatisticamente significativa, uma vez que o processo de encapsulamento não é capaz de alterar as propriedades fotoelásticas da fibra ótica, podendo gerar apenas atrasos na resposta do sensor. Para o controle da temperatura interna das amostras, apenas o sensor encapsulado foi utilizado.

A partir da Equação 2.2, apresentada no capítulo 2 desta tese, é possível estimar qual a calibração teórica do sensor. Portanto, considerando os valores padrão para o coeficiente termo-ótico ($\alpha_\Lambda = 8,3 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$) e para o coeficiente de expansão térmica da fibra ($\alpha_n = 0,55 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$), índice de refração efetivo (n_{ef}) de $1,447$ e espaçamento da máscara de fase ($\Lambda/2$) de $1064,9 \text{ nm}$, o valor teórico da variação do comprimento de onda em função da deformação específica calculado é de $13,63 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, valor $10,32\%$ maior que o obtido experimentalmente. Esta variação destaca a importância da calibração experimental do sensor, pois o uso da equação teórica pode levar à erros de medida.

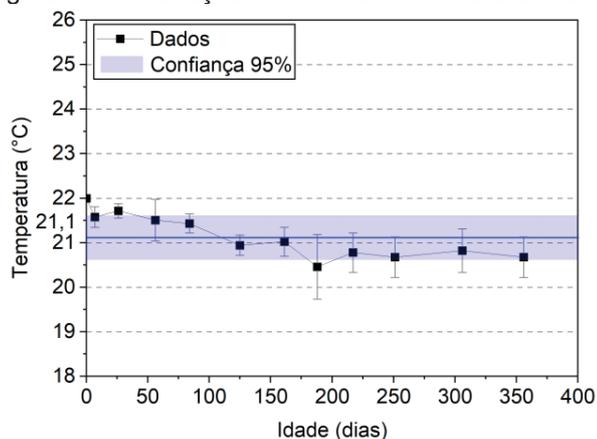
Os sensores internos foram inseridos nos corpos de prova durante o processo de concretagem. Ainda que o objetivo do uso de sensores para medida de temperatura nas amostras tenha visado a compensação térmica do efeito cruzado dos sensores. Para o monitoramento da RAS, após o devido resfriamento das amostras para temperatura ambiente, cada sensor de temperatura foi individualmente monitorado pelo período de 30s , com frequência de aquisição de 2Hz , totalizando 60 leituras em cada sensor de cada amostra. O comprimento de onda (Figura 4.44a) médio foi considerado para a estimativa da temperatura

e deformação das amostras, e a intensidade (Figura 4.44b) foi monitorada para verificar se ocorreu a redução da intensidade do sinal ao longo do tempo. Para cada uma das idades foi calculado o valor médio da temperatura registrada no interior das amostras cilíndricas, e os resultados podem ser observados na Figura 4.45.



Fonte: Autoria própria

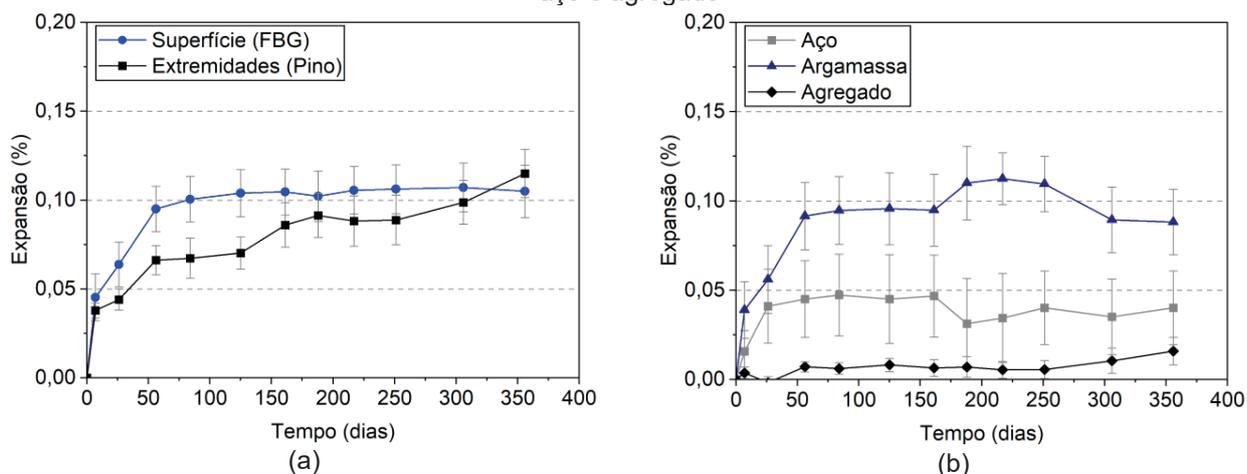
Figura 4.45 - Variação térmica no interior das amostras



Como as amostras passavam por resfriamento em ambiente climatizado, a temperatura interna manteve-se relativamente estável ao longo do período dos ensaios, com valor próximo à 21,1°C. As variações observadas são esperadas e estão relacionadas a variações no funcionamento do ar-condicionado do laboratório e se encontram dentro do intervalo de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Considerando a variação térmica das amostras, os valores de variação de comprimento de onda nos sensores de deformação foram devidamente corrigidos, permitindo a avaliação da expansão das amostras desconsiderando as variações térmicas. Na Figura 4.46 são apresentadas as expansões medidas por sensores FBG nas amostras cilíndricas de concreto afetado por RAS.

Figura 4.46 - Expansão medidas por FBG (a) na superfície e (b) no interior do concreto: argamassa, barra de aço e agregado



Fonte: Autoria própria

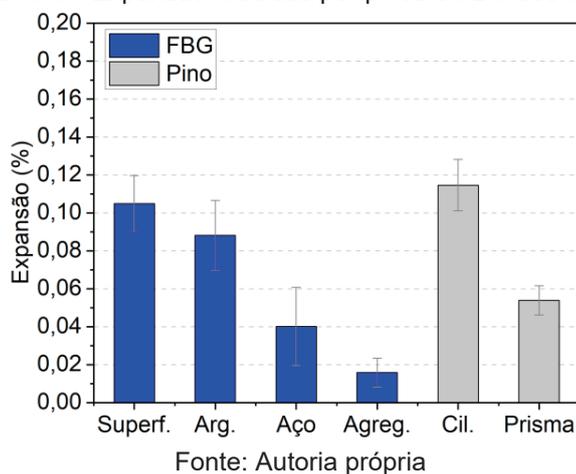
A partir da análise da Figura 4.46b, é possível observar que as leituras da superfície da amostra e dos sensores posicionados na argamassa apresentaram comportamento semelhante, apresentando aumento da expansão nos primeiros 100 dias e estabilização próximo de 0,10% até 365 dias. Comportamento semelhante também foi observado nos ensaios realizados nos pórticos de expansão (Figura 4.27). Após o teste de Tukey ($\alpha=0,05$), é possível concluir que o local de fixação do sensor (superfície ou argamassa) não gerou diferenças estatisticamente significativas na expansão aos 365 dias, ainda que os sensores internos tenham apresentado uma maior variação nas leituras.

Os sensores que realizaram medidas de expansão na barra de aço e nos agregados apresentaram valores de expansão inferiores àqueles observados na argamassa e superfície. Estes sensores apresentaram ainda variações estatisticamente significativas entre si aos 365 dias. As medidas de expansão na barra de aço e nos agregados, foram, respectivamente, 0,040% e 0,015% aos 365 dias.

O erro nas leituras da expansão dos sensores dos agregados foi proporcional ao baixo valor de expansão registrado. Pode-se observar, na Figura 4.47, que o sensor instalado na

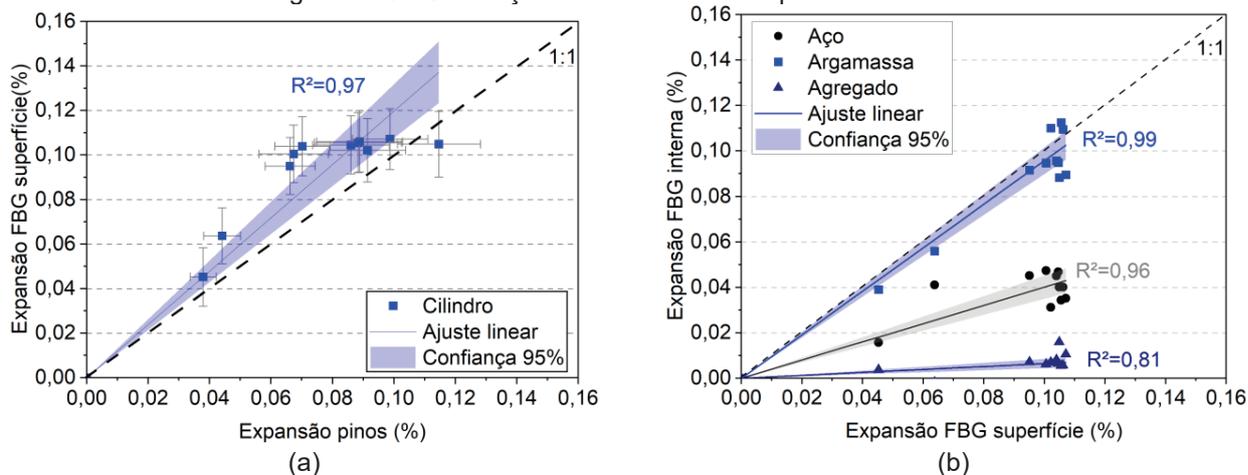
superfície do corpo de prova foi o que apresentou menor erro padrão da média das leituras, seguido pelo sensor na argamassa. A maior variação foi encontrada para as leituras realizadas nas barras de aço. O sensor da superfície da amostra não estava em contato direto com o cimento Portland e a solução de poros, o que pode ter reduzido a variabilidade das leituras. Já as leituras internas podem sofrer interferência da presença de algum agregado próximo ao sensor, gerando variação nas leituras entre as amostras. Ainda assim, os erros observados nos sensores FBG são iguais aos erros obtidos na leitura da expansão dos cilindros (0,015%). Na Figura 4.48 são apresentadas as correlações obtidas a partir das leituras de expansão com pinos e utilizando sensores FBG.

Figura 4.47 - Expansão medidas por pinos e FBG aos 365 dias



Fonte: Autoria própria

Figura 4.48 - Correlação entre leituras de expansão realizadas



Fonte: Autoria própria

A partir da Figura 4.48a, nota-se que as leituras com FBG na superfície dos cilindros aproximaram-se das leituras realizadas com os pinos metálicos, tendo em vista que as amostras apresentam as mesmas condições de moldagem e geometria – conforme já discutido no item 4.2.4. Esta verificação corrobora a hipótese de que a variação observada entre as leituras de expansão em prismas e cilindros ocorreu em decorrência da geometria das amostras. Após ajuste linear dos dados, o coeficiente angular apresentou inclinação 1,19. O valor é, portanto, 19% superior à proporcionalidade (linha tracejada 1:1), indicando uma tendência de as medidas superficiais no terço médio das amostras realizadas com FBG serem superiores às leituras realizadas no pórtico de expansão com pinos. Esta variação pode estar relacionada à maior homogeneidade e concentração de agregados graúdos no terço médio do cilindro, bem como de um menor efeito da lixiviação na parte central da amostra, conforme também observado no ensaio DRI e apresentado na Figura 4.41.

As correlações entre as leituras na superfície da amostra e aquelas realizadas no seu interior (Figura 4.48b), indicam que as leituras realizadas na superfície e na argamassa apresentaram a mesma proporcionalidade, aproximando-se na linha 1:1, confirmando, assim, a equivalência nas leituras realizadas.

A barra de aço com sensor FBG registrou expansões em média 61% menores do que as encontradas para a superfície, apresentando valor médio de 0,04% aos 365 dias. Esta redução pode estar relacionada à diferença entre os módulos elásticos do aço e do concreto. Destaca-se, porém, que a presença da barra não gerou alterações na leitura de expansão da superfície da amostra, pois, ainda que a presença de armaduras cause uma redução da expansão quando comparados com cilindros avaliados em laboratório em expansão livre (REAIEZH, 2022; VO et al., 2021), a presença do aço não gerou efeitos de confinamento.

Mohammed, Hamada e Yamaji (2003) observaram que o uso de apenas uma barra de 12,7mm no centro de blocos de concreto (25x25x60cm) afetados por RAS gerou, após 197 dias, uma deformação da barra de aço 3,9 vezes menor do que a deformação na superfície do concreto. O efeito de confinamento foi observado pelos autores apenas com uso de chapas metálicas na extremidade das barras de aço ou com uso de armaduras do tipo malha ou gaiola, quando ocorre uma maior transferência de tensões devido às restrições geradas na amostra. A partir dos dados adquiridos com FBG nesta tese, a diferença entre deformações medidas na superfície das amostras e na barra de aço inserida no concreto foi de 2,61 vezes – resultado próximo ao obtido por Mohammed, Hamada e Yamaji (2003), sendo que a diferença observada

pode estar relacionada ao uso de amostras e barras de aço com geometria, dimensões e posicionamentos diferentes.

Apesar de apresentar deformação menor do que a do concreto e ausência do efeito de confinamento, foi possível comprovar que o aço recebe tensões provenientes da RAS, fato que pode interferir na capacidade portante de elementos estruturais. Considerando o módulo elástico (E) de 200 GPa para o aço CA-50 utilizado e a deformação específica (ε) de 0,04% medida pelo sensor FBG na barra de aço, é possível estimar a tensão (σ) gerada na armadura devido à expansão do concreto pela Lei de Hooke, que resulta em 80 MPa (16% da tensão nominal da barra).

Ainda que no dimensionamento de vigas de concreto armado por flexo-compressão a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabeleça o limite de alongamento do aço em 1,00%; o limite de deformação para tração do concreto na ruptura é de 0,035% (item 24.5.4.1). Assim, expansões acima deste valor já induziriam o aparecimento de fissuras - como observado a partir dos 7 dias nas amostras desta tese.

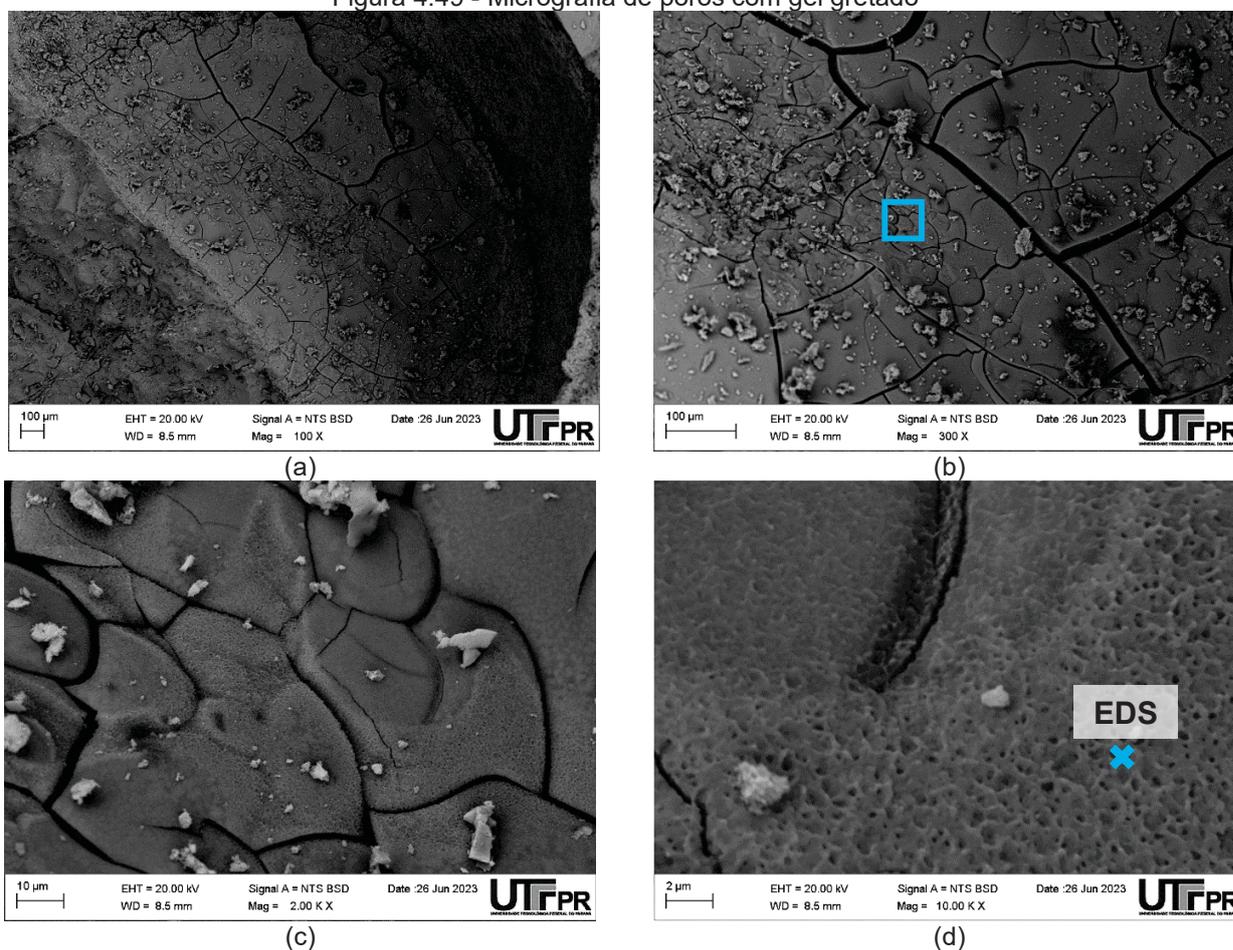
Com relação à expansão dos agregados, é possível observar na Figura 4.48b que os valores são cerca de 5 vezes menores do que a expansão observada na superfície das amostras. Esperava-se, contudo, uma maior expansão nos agregados, como mostrou um estudo preliminar realizado por Macioski et al. (2021), tendo em vista o início da reação no interior e superfície dos agregados. Contudo, a partir dos dados desta tese, não foi possível observar expansões significativas na superfície dos agregados instrumentados.

Uma hipótese seria a de que, como considerado em alguns modelos numéricos de expansão por RAS, o que exerce pressão interna dentro das falhas e poros da microestrutura é o gel da RAS (MULTON; SELLIER; CYR, 2009), devido à pressão hidrostática exercida pelo gel nos poros capilares, gerando microfissuras (GHOLIZADEH VAYGHAN; RAJABIPOUR; ROSENBERGER, 2016). Assim, o agregado apresentaria reduzida expansão quando comparado à matriz cimentícia (argamassa), como demonstrado pelos resultados obtidos. Outra hipótese seria a de que a resina utilizada para fixar o sensor na superfície do agregado poderia ter impedido a reação com a pasta de cimento e a formação do gel da RAS. Contudo não foi possível localizar na literatura nenhum estudo que tenha verificado a alteração volumétrica dos agregados durante a RAS para comparação com os dados obtidos neste estudo.

4.3.5 Análise da microestrutura

Aos 365 dias, uma amostra de concreto teve sua microestrutura avaliada em microscópio eletrônico de varredura (MEV) por elétrons retroespalhados. Primeiramente, são apresentadas micrografias (Figura 4.49) do gel gretado precipitado no interior de poros da amostra de concreto, caracterizado por uma superfície com textura lisa e fissuras mapeadas. O quadrado na Figura 4.49b indica a região de ampliação apresentada na Figura 4.49c e Figura 4.49d, enquanto o “X” indica o local de realização da avaliação da composição química potencial por EDS.

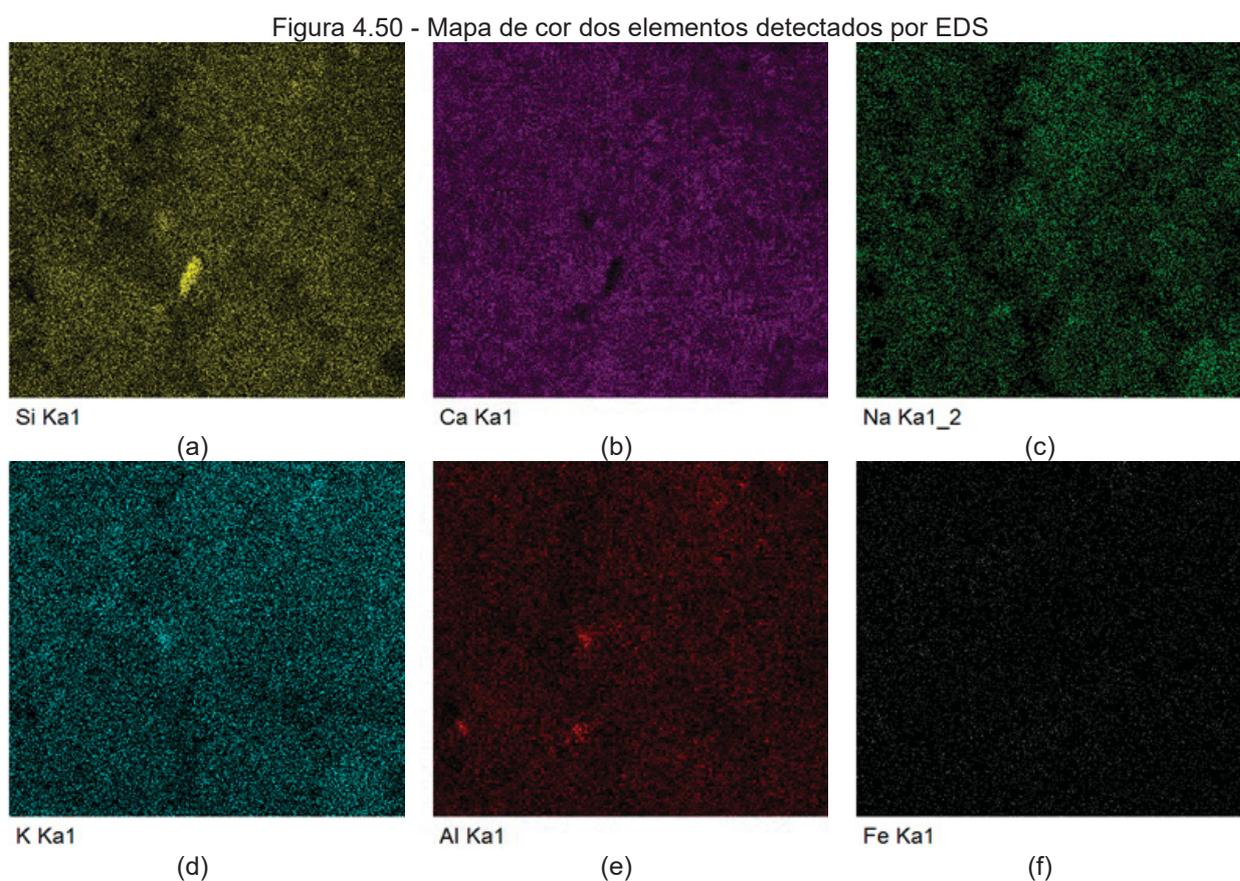
Figura 4.49 - Micrografia de poros com gel gretado



Fonte: Autoria própria

A partir das observações realizadas, nota-se que o gel gretado apresenta morfologia uniforme e com baixa rugosidade em sua superfície, mesmo em altas ampliações (10,000X). A ausência de cristais com morfologia definida reforça o grau de amorfismo do produto de

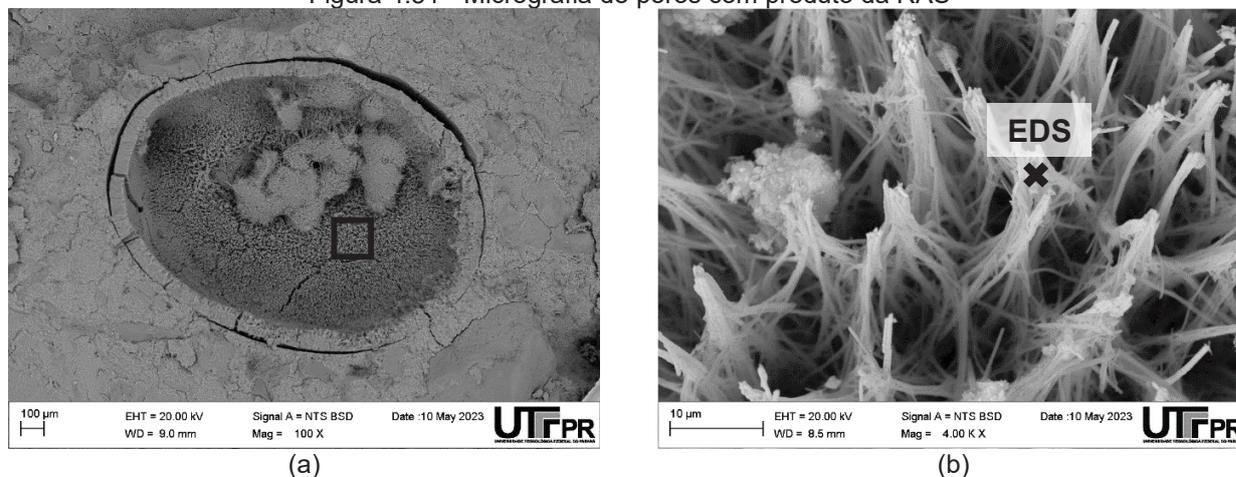
reação. A análise por EDS confirmou a presença de elementos silício e cálcio, com menores teores de sódio, potássio e alumínio – confirmando se tratar do gel proveniente da RAS. Para avaliar a distribuição destes elementos na amostra, realizou-se a análise de mapa de cor destes elementos, conforme apresentado na Figura 4.50. A partir dos resultados obtidos, comprova-se que a distribuição dos elementos é homogênea e que a contribuição dos elementos alumínio e ferro são inferiores aos demais.



Fonte: Autoria própria

Em outras regiões da amostra, utilizando ampliações de 100X e 4000X, foi possível localizar poros com superfície interna recoberta por precipitado fissurado texturizado, como apresentado na Figura 4.51.

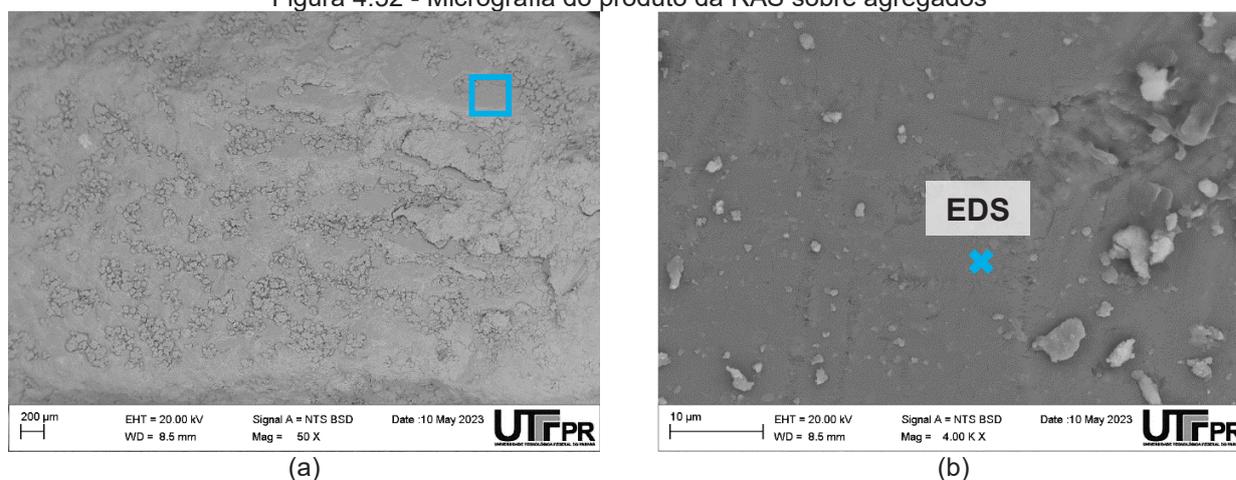
Figura 4.51 - Micrografia de poros com produto da RAS



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar, então, que o material presente no interior dos poros apresentava morfologia rendada com comprimento reduzido (cerca de $10\ \mu\text{m}$) e pontas interconectadas, supostamente do gel de RAS recristalizado. Após realização de EDS no ponto indicado, foi comprovada a presença dos elementos sódio, potássio, silício e cálcio, elementos típicos do produto formado pela RAS. Hasparyk (2005) explica que durante a investigação do gel de RAS é possível encontrar tanto produtos maciços gretados quanto cristalizados. Em alguns casos esses produtos podem apresentar morfologia rendada nos poros ou serem aciculares de composição sílico-cálcico potássica. A Figura 4.52, por sua vez, ilustra um material precipitado sobre a superfície de agregados fissurados.

Figura 4.52 - Micrografia do produto da RAS sobre agregados

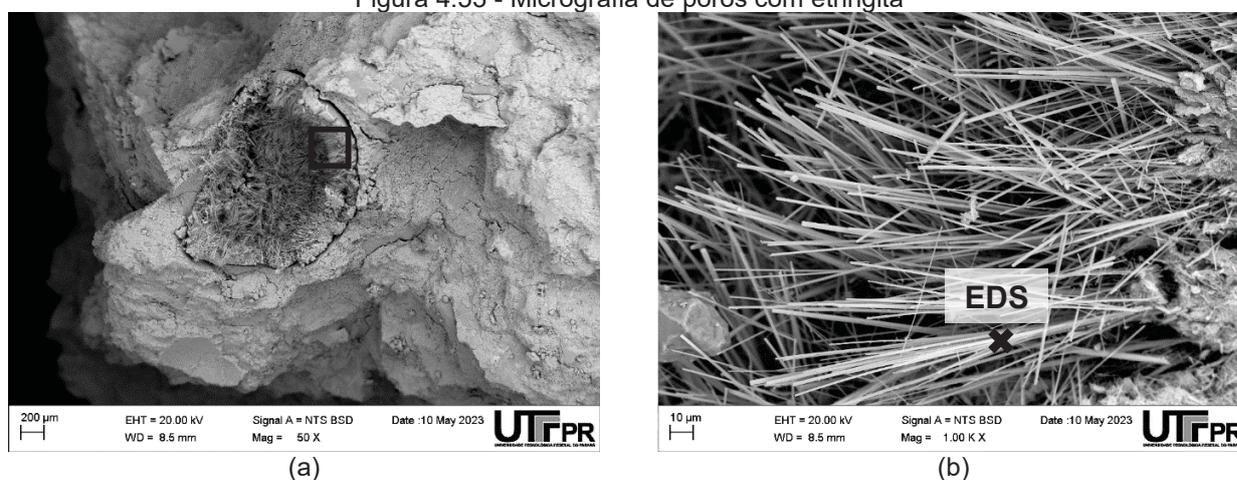


Fonte: Autoria própria

Foi possível identificar, na superfície do agregado fissurado, produto que apresentava morfologia maciça. A composição potencial desse precipitado foi realizada por EDS, no qual foi possível identificar produtos cristalizados com altos teores de sódio, potássio e silício em sua composição química.

Em alguns poros da amostra também foi possível, em uma ampliação de 50X, a identificação de poros completamente preenchidos (Figura 4.53a) por estruturas aciculares longas (cerca de 100 μm) – diferentes daquelas visualizadas na Figura 4.51b.

Figura 4.53 - Micrografia de poros com etringita



Fonte: Autoria própria

Foi realizada ampliação de 1000X na região (Figura 4.53b), após realização da análise potencial química por EDS, e confirmou-se a presença dos elementos alumínio, cálcio, enxofre, além de baixo teor de silício. A morfologia observada e composição química são coerentes com presença de etringita, um mineral composto de sulfato de cálcio e alumínio hidratado (HEWLETT; LISKA, 2019), gerado devido à adição de gesso no cimento para o controle da pega.

Apesar de ser uma importante ferramenta na análise dos produtos formados na RAS, é importante destacar que a quantificação da composição química do gel por EDS possui algumas limitações devido à interação dos elétrons na profundidade da amostra, limitações na quantificação de elementos leves (hidrogênio, carbono, oxigênio), interferências devido à metalização da amostra e desconsidera-se a perda ao fogo (WONG; BUENFELD, 2006). Desta forma, acredita-se que a técnica de fluorescência de raio X (FRX) é a mais indicada para quantificação da composição química do gel de RAS. Porém, a aplicação da técnica exige a extração dos produtos de reação para sua avaliação, o que torna a aplicação da técnica

inviável em grande parte dos estudos. Devido à essas dificuldades e limitações na realização da FRX, a maior parte das análises do gel de RAS na literatura é realizada por EDS considerando apenas a relação atômica elementar normalizada.

Isto posto, a partir da quantificação por EDS realizada nas micrografias e apresentadas anteriormente, foi possível verificar as relações atômicas encontradas nos produtos de reação e sua posterior comparação com a literatura (HASPARYK, 2005; KURTIS et al., 1998; REAIEZH, 2022; ŠACHLOVÁ; PŘIKRYL; PERTOLD, 2010). Os dados referentes à composição química potencial são apresentados na Figura 4.54 e as relações atômicas percentuais calculadas são apresentadas na Figura 4.55.

Figura 4.54 - Diagrama ternário da composição química potencial do gel de RAS em % atômica

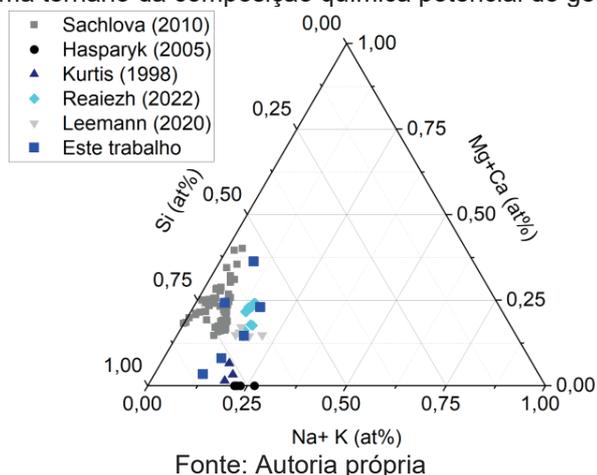
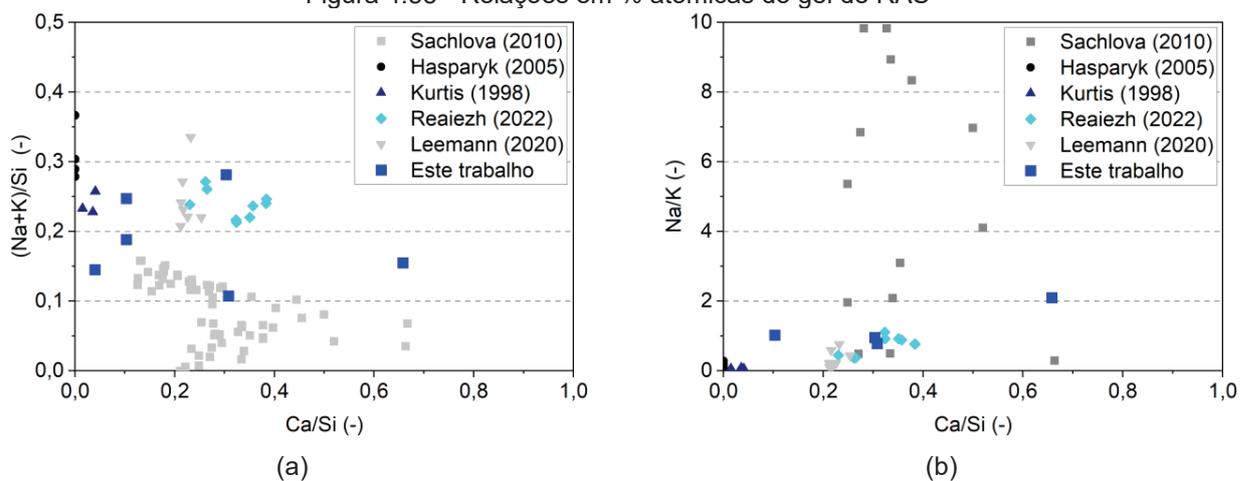


Figura 4.55 - Relações em % atômicas do gel de RAS



Gholizadeh-Vayghan e Rajabipour (2017b) realizaram um levantamento de 100 composições de gel de RAS, medidas por EDS. Os autores observaram que o sódio está presente em maiores quantidades nos géis em comparação com o potássio. Já o magnésio existe em quantidades muito pequenas em comparação com o cálcio. Hou, Struble e Kirkpatrick (2004) observaram que as composições dos géis de RAS situam-se tipicamente no intervalo 0,05 a 0,6 para $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\text{SiO}_2$ e 0 a 0,2 para $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ (razões molares). A relação $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$ é reduzida quando é utilizado aditivo de inibição como lítio (KAWAMURA; FUWA, 2003), enquanto o uso de pozolanas tende a formar géis com maior teor de cálcio, reduzindo a capacidade de expansão do gel proveniente da RAS (HELMUTH et al., 1993). Relações atômicas Ca/Si entre 0,2 e 0,8 e $(\text{Na}+\text{K})/\text{Si}$ de 0,2 a 0,5 foram observados em um estudo conduzido por Ahmed et al. (2022). Pode-se observar, ainda, uma maior variação no teor de base (MgO e CaO) nas composições obtidas, uma vez que as relações (Figura 4.55) se encontram na faixa de 0,1 a 0,27 para $(\text{Na}+\text{K})/\text{Si}$ e de 0,03 a 0,67 para Ca/Si.

Assim, a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que os teores de sílica e álcalis encontrados no presente estudo são semelhantes aos observados pelos demais autores (HASPARYK, 2005; KURTIS et al., 1998; REAIEZH, 2022; ŠACHLOVÁ; PŘIKRYL; PERTOLD, 2010). Destaca-se a grande variabilidade nas relações químicas obtidas devido à variabilidade de minerais, cimentos e equipamentos utilizados para este tipo de análise. Sabe-se que quando apresenta estrutura amorfa, o gel de RAS apresenta teores mais elevados de sódio na composição (LEEMANN; SHI; LINDGÅRD, 2020b). Já o gel de RAS cristalino poroso costuma apresentar teores mais elevados de álcalis quando comparado ao gel maciço, que se encontra na estrutura adsorvido e não quimicamente combinado, podendo ser substituído por íons cálcio e lixiviado para outras regiões da amostra (HELMUTH et al., 1993).

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos na caracterização do agregado reativo, da expansão em concreto conforme norma brasileira NBR 15577 (ABNT, 2018f), dos ensaios complementares, bem como do monitoramento realizado por sensores FBG, é possível concluir que:

- O ensaio de petrografia demonstrou o melhor potencial de identificação de fases minerais reativas, uma vez que técnicas como TG, DTA, FRX, DRX apresentam baixa

capacidade na identificação de minerais com alto grau de alteração microestrutural e característica amorfa. Os resultados obtidos demonstraram teores elevados de quartzo deformado e biotita transformada em clorita. A coleta de uma amostragem representativa na jazida, a cuidadosa preparação das lâminas e a avaliação por petrógrafo experiente são essenciais para a correta aplicação do ensaio.

- O agregado utilizado nesta pesquisa possui alto teor de álcalis (equivalente alcalino de 7,7%) em sua composição e apresenta grãos com alto grau de alteração estrutural, compatível com gnaises bandados – conforme mapa geológico do estado do Paraná. Não foi possível encontrar na literatura dados consolidados sobre o levantamento de agregados reativos no Brasil, o que dificulta a comparação de resultados obtidos com outros estudos. Destaca-se que parte dos estudos realizados no Brasil ainda são conduzidos utilizando ensaio acelerado em amostras de argamassa, que podem apresentar resultados inconsistentes.

- Os ensaios de expansão realizados em amostras cilíndricas de concretos apresentaram resultados superiores aos encontrados nos ensaios realizados em prismas avaliados nas mesmas condições, apresentando aos 365 dias expansões de 0,11% e 0,05% respectivamente. Este comportamento está relacionado à influência da orientação da moldagem das amostras (cilindro na vertical e prisma na horizontal), uma vez que existe a tendência de acúmulo de umidade sob os agregados que passam a apresentar uma contribuição no sentido transversal. Assim, existe a necessidade de se propor fatores para correlação dos resultados de ensaios realizados em diferentes geometrias, dimensões e origem da amostra (moldada ou extraída), de forma a permitir a comparação com os limites estabelecidos nas normativas vigentes e a correta classificação de estruturas.

- Os ensaios de diagnóstico realizados foram de grande importância na confirmação do mecanismo de reação e ausência de efeitos associados à ataques por sulfatos, por exemplo. O ensaio SDT auxiliou na avaliação do grau de degradação do concreto pela variação da histerese da curva tensão/deformação. Esse ensaio é realizado com equipamento já utilizado na área de concreto, e não sofre influência do operador. Por sua vez, o ensaio DRI possibilitou a identificação do grau de fissuração das amostras e o acompanhamento da cinética da reação. Além disso, o ensaio permite a confirmação do mecanismo de degradação; uma vez que os efeitos associados a fenômenos como gelo-degelo, ataque por sulfatos e RAS podem ser identificados pela classificação dos tipos de fissuras na amostra (início nos agregados, pasta ou superfície da amostra). Por fim, as micrografias obtidas por meio do MEV

confirmaram a morfologia do produto de reação e composição química potencial do gel de RAS.

- O uso do sensor FBG no monitoramento da expansão de amostras de concreto se mostrou eficiente na capacidade de avaliação da temperatura e deformação específica das amostras. O sensor possui ainda o potencial de monitorar a estrutura em diferentes estágios, iniciando durante sua construção (monitoramento do calor de hidratação nas idades iniciais) e estendendo sua aplicação em técnicas dinâmicas ao longo do tempo. O uso de sensores térmicos associados aos sensores de deformação possibilitaria leituras sem a necessidade de resfriamento das amostras, eliminando os efeitos térmicos devido à dilatação em estruturas reais.

- As leituras de expansão realizada por sensores FBG na superfície da amostra e na argamassa, realizadas por sensores embutidos no interior dos cilindros, apresentaram expansões equivalentes àquelas obtidas em ensaios com pinos realizados conforme a normativa brasileira, porém com menor erro nas leituras superficiais. Este resultado demonstra a confiabilidade da aplicação de sensores óticos no monitoramento à longo prazo em estruturas de concreto. Cabe ressaltar que a fixação dos sensores no terço médio das amostras contribui para eliminar possíveis variações relacionadas ao posicionamento dos pinos, dispersão dos agregados na amostra e efeitos da exsudação ou segregação durante a moldagem. A aquisição dos dados realizada por equipamento eletrônico com maior precisão, com uma taxa de 120 leituras por minuto, e a eliminação da interferência do operador e do posicionamento da amostra no pórtico também contribuem para aumentar a confiabilidade das leituras realizadas.

- Com relação às leituras de expansão realizadas por sensores FBG fixados nas barras de aço, posicionadas no interior das amostras de concreto, foi observada uma redução de 61% nas expansões em comparação à expansão livre da amostra. Apesar dessa redução, foi possível verificar que ocorre uma transferência parcial das deformações do concreto para a barra de aço, o que indica que há um efeito na capacidade portante das estruturas devido à RAS. Tampouco foi possível observar o efeito de confinamento devido à presença da barra de aço.

- Os resultados de monitoramento da expansão no agregado instrumentado apresentaram expansão cinco vezes menor em comparação com as medições registradas na superfície do concreto. A baixa capacidade expansiva dos agregados corrobora o mecanismo

já proposto na literatura para a RAS, no qual a pressão dentro dos poros é atribuída ao gel formado pela RAS. Vale ressaltar que não foi possível encontrar na literatura nenhum estudo que tenha realizado o monitoramento da expansão dos grãos de agregado, o que evidencia o caráter inovador do presente estudo.

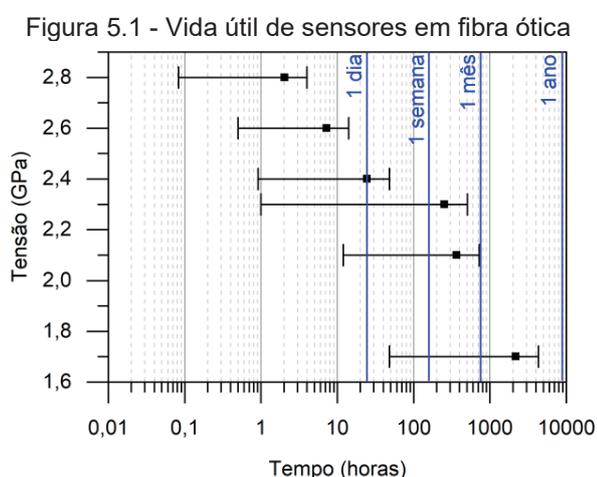
Isto posto, este capítulo contribuiu com uma caracterização abrangente de um agregado reativo, sua avaliação por meio de ensaios normatizados e ensaios complementares utilizados no diagnóstico da RAS. Além disso, foi realizada aplicação do sensor FBG no monitoramento da reação, com a vantagem de possibilitar o monitoramento interno do concreto. Verificou-se que a distribuição de deformações foi diferente para cada região avaliada, e os resultados obtidos foram coerentes com aqueles encontrados por técnicas tradicionais e literatura especializada.

5 DURABILIDADE DO SENSOR FBG

5.1 INTRODUÇÃO

Estima-se que FBGs utilizadas no monitoramento estrutural possuam durabilidade acima de 25 anos (RAJAN; PRUSTY, 2016; YIN; RUFFIN; YU, 2008). Porém, apesar de já existirem obras instrumentadas com sensores em fibra ótica com rede de Bragg (FBG) por mais de 20 anos (KO; NI, 2005), não existem informações específicas disponíveis acerca da durabilidade do sensor no concreto.

Um dos fatores que influencia a durabilidade do sensor é o nível de tensão aplicado durante seu uso. Wang e Zupko (1978) *apud* Mitschke (2016) demonstram que, com o aumento da tensão aplicada, a vida útil de sensores em fibra ótica é reduzida, conforme apresentado na Figura 5.1. Resultados semelhantes foram observados por Othonos e Kalli (1999) que descrevem o efeito da fluência na durabilidade do sensor.



Fonte: Traduzido de Wang e Zupko (1978) *apud* Mitschke (2016)

Considerando que não costumam ocorrer tensões acima de 1,6 GPa no concreto, infere-se que a durabilidade do sensor em fibra ótica seja da ordem de décadas. No entanto, é importante destacar que observações experimentais têm mostrado uma redução na intensidade do sinal refletido de sensores em fibra ótica ao longo dos anos, o que pode afetar sua durabilidade. Alguns modelos de vida útil e envelhecimento acelerados já foram propostos, porém, devido à ampla variedade de sensores, fibras e ambientes, a estimativa da durabilidade dos sensores ainda é incerta (KASHYAP, 2010).

As fibras óticas são frágeis e estão sujeitas a quebra, principalmente durante o processo de instalação em estruturas. Portanto, é essencial fornecer uma proteção de superfície adequada à fibra. Segundo Grattan e Meggitt (1999), em aplicações no concreto, é comum ocorrerem danos e quebras nos sensores durante o processo de concretagem. Para os autores, se uma fibra sobrevive ao processo de moldagem e concretagem, suas perspectivas de sobrevivência a longo prazo são boas. Considerando que a vida útil das estruturas civis é superior a 50 anos, é crucial garantir que o sensor permaneça funcional ao longo deste período. Devido à natureza recente do estudo de fibras óticas embutidas no concreto, os efeitos decorrentes do envelhecimento do sensor ainda não foram completamente determinados.

As fibras óticas apresentam composição rica em silício amorfo que, na presença de bases alcalinas como hidróxidos de cálcio, magnésio, potássio e sódio - comuns na solução de poros do concreto - geram um pH alto no concreto, que pode levar a FBG a interagir quimicamente com estas bases. Não foram encontrados na literatura estudos que abordem a durabilidade do sensor após sua aplicação no concreto, tampouco sobre a influência de ambientes agressivos e tipo de proteção na vida útil da FBG.

No caso da avaliação da RAS por meio de FBG realizada neste trabalho, em que é adicionado hidróxido de sódio na mistura para induzir a reação e utilizadas altas temperaturas para acelerar reação, foram observadas falhas em parte dos sensores utilizados internamente nas amostras. Assim, o **objetivo deste capítulo é avaliar a durabilidade de sensores FBG em diferentes soluções agressivas, bem como a durabilidade dos sensores FBG embutidos em concreto**. A partir dos resultados obtidos espera-se solucionar possíveis problemas de durabilidade do sensor, tornando seu uso viável a longo prazo no monitoramento estrutural.

5.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.2.1 Avaliação da durabilidade de sensores em solução

Para investigar a influência de diferentes soluções agressivas na intensidade do espectro e na variação do comprimento de onda refletido pelas redes de Bragg inscritas no

núcleo das fibras óticas ao longo do tempo, foram utilizadas 10 soluções contendo diferentes produtos químicos, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Soluções utilizadas para avaliação do sensor FBG

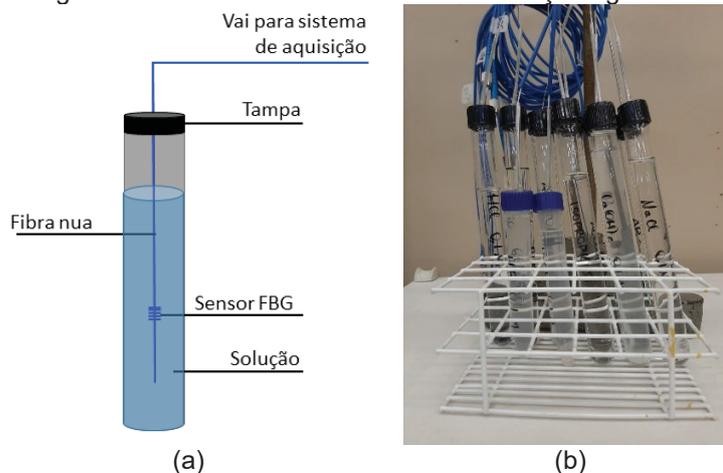
Solução	Reagente	Concentração de íons	pH
A01	Ar	-	-
A02	Água destilada	-	7,0
A03	Álcool isopropílico 99,93%	-	7,0
A04	Acetona 99,50%	-	-
A05	Óleo mineral 99,00%	-	-
A06	Ácido clorídrico 0,1M	0,1 M H ⁺ e 0,1 M Cl ⁻	1,0
A07	Cloreto de sódio 0,1M	0,1 M Na ⁺ e 0,1 M Cl ⁻	7,0
A08	Hidróxido de cálcio 0,1M	0,05 M Ca ²⁺ e 0,2 M OH ⁻	13,0
A09	Hidróxido de sódio 0,1M	0,1 M Na ⁺ e 0,1 M OH ⁻	13,0
A10	Ácido fluorídrico 0,1M	0,1 M H ⁺ e 0,1 M F ⁻	1,0
A11	Querosene 99,50%	-	-

Fonte: Autoria própria

A escolha das soluções considerou o ataque de diferentes tipos de compostos químicos como: iônicos e moleculares, orgânicos e inorgânicos, ácidos e básicos, polares e apolares, solúveis e insolúveis. As concentrações das bases foram arbitradas com base na concentração de íons na solução de poros do concreto que apresenta pH próximo à 13 e concentração de íons Na⁺, K⁺ e Ca²⁺ variando entre 0,05 e 0,4 M (KIM; OLEK; JEONG, 2015; PLUSQUELLEC et al., 2017; PU et al., 2012). Além disso, concentrações de bases em 0,1 M costumam ser utilizadas para simular a solução de poros do concreto em estudos de corrosão de armaduras (WILLIAMSON; ISGOR, 2016).

Os sensores desta etapa foram produzidos de acordo com a metodologia apresentada no item 3.2.2 desta tese, e posteriormente inseridos em tubos de ensaios contendo as soluções apresentadas na Tabela 5.1. A região da fibra ótica nua e a região da FBG sem acrilato foram imersas na solução durante o período de 1 ano (Figura 5.2), e foram avaliadas com relação ao seu espectro: comprimento de onda e intensidade do sinal. O sensor A01, mantido no ar, foi utilizado como referência para a compensação dos efeitos da temperatura nos demais sensores.

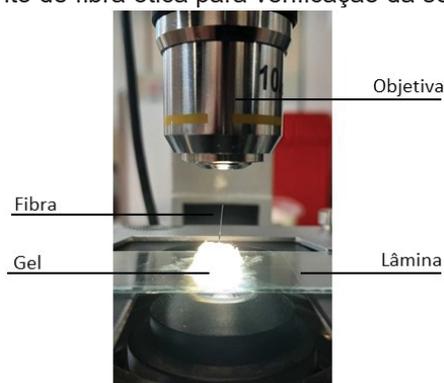
Figura 5.2 - Sensores FBG imersos em solução agressiva



Fonte: Autoria própria

Após os 365 dias de avaliação, os sensores foram retirados da solução e limpos com água destilada. Para avaliação de alterações na superfície (acrilato e fibra de vidro) e no diâmetro das fibras, os sensores foram analisados em um microscópio de luz transmitida (XSZ-N107, Amtechhe) com câmera digital acoplada. Para facilitar a visualização das fibras, elas foram clivadas (corte perpendicular ao eixo da fibra) e fixadas verticalmente com o auxílio de um gel translúcido à base de água, e horizontalmente sobre a superfície de uma lâmina de microscópio (Figura 5.3).

Figura 5.3 - Posicionamento de fibra ótica para verificação da seção em microscópio ótico



Fonte: Autoria própria

Visando confirmar a alteração microestrutural verificada durante a microscopia ótica, a amostra A08 (hidróxido de cálcio) foi levada ao microscópio eletrônico de varredura para confirmação do ataque da base na superfície da fibra ótica. O mesmo procedimento utilizado

para as amostras de concreto (item 4.1.3 desta tese) foi utilizado para a microscopia dos sensores atacados.

5.2.2 Avaliação da durabilidade de sensores em concreto

Para a avaliação da RAS, 15 cilindros de concreto (100x200mm) foram moldados e instrumentados com 15 sensores FBG externos e 32 sensores FBG encapsulados no interior das amostras. Após o período de 365 dias, nenhum sensor externo apresentou falhas. No entanto, em relação aos sensores embutidos na parte interna das amostras, foi observado que 30% deles apresentaram alguma interferência seguido pela perda de sinal, e precisaram ser desconsiderados para a análise dos dados, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Número de sensores FBG no início e fim do estudo

Local	Medida	Início	Fim	Perda
Agregado	Deformação	8	3	63%
Argamassa	Deformação	6	4	33%
Argamassa	Temperatura	12	8	33%
Barra de aço	Deformação	6	3	50%
Superfície	Deformação	15	15	0%
TOTAL		47	33	30%

Fonte: Autoria própria

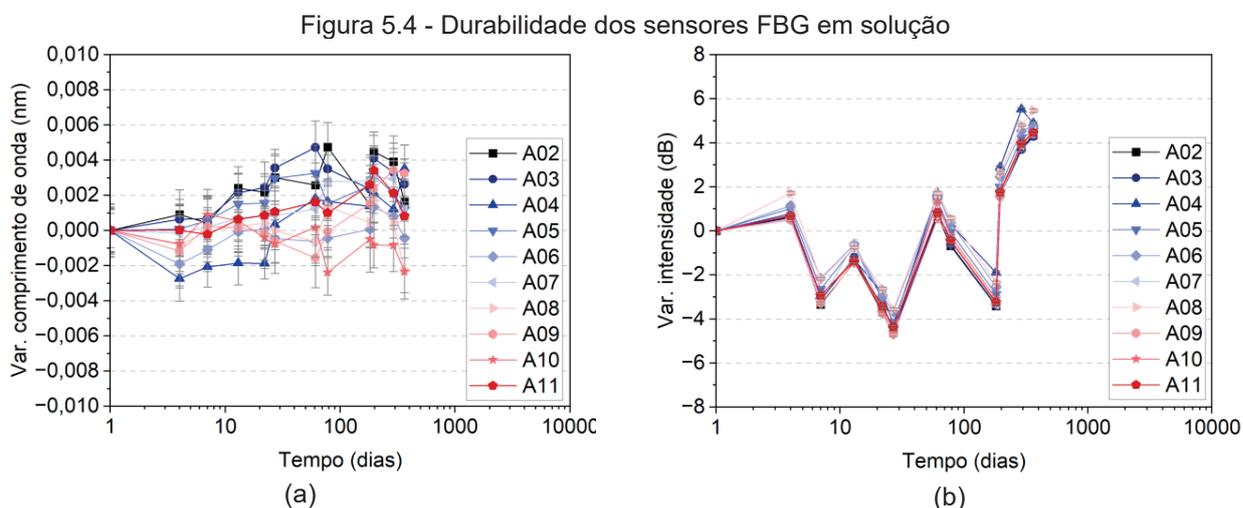
Para compreender a causa das falhas, o espectro refletido dos sensores foi analisado ao longo do tempo. Além disso, algumas amostras foram aquecidas para verificar as alterações no sinal e confirmar a formação de cavidade ressonante nas fibras óticas.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Avaliação da durabilidade de sensores em solução

Para verificar a influência das diferentes soluções na durabilidade dos sensores FBGs ao longo do tempo, 10 soluções com diferentes tipos de produtos químicos foram utilizadas, conforme apresentado na Tabela 5.1. Os resultados da variação do comprimento de onda e

intensidade são apresentados na Figura 5.4, em que o sensor A01 foi utilizado como referência para a compensação térmica.

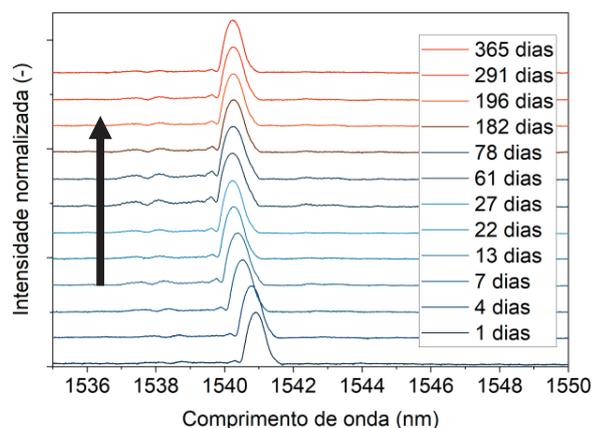


Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 5.4a que ao longo de 1 ano de monitoramento os sensores imersos em solução apresentaram variações entre -3pm e +5pm no comprimento de onda. A variação observada é superior à resolução de $\pm 1\text{pm}$ do equipamento utilizado (MicronOptics, SM-125). Considerando os coeficientes de calibração de deformação específica e térmicos adotados nesta tese, as variações seriam equivalentes a 0,0004% ou $0,41^\circ\text{C}$ – não representativo para as leituras de expansão realizadas. Tendo em vista que a correção da influência térmica foi eliminada e o período da rede de Bragg não poderia ser alterada, a variação no comprimento de onda pode ser explicada pela possível alteração do índice de refração da fibra de vidro devido à interação com as soluções ou erros de demodulação do sinal pelo sistema de interrogação ótico. Não foi possível identificar uma tendência de variação no comprimento de onda para as soluções ao longo do tempo.

Com relação à intensidade do sinal (Figura 5.4b), foram observadas variações de -4,5dB e +5,5dB. Esta variação não influencia na detecção do sensor e está relacionada à perda de sinal por inserção devido aos conectores utilizados no equipamento.

Para os sensores FBG, a intensidade do sinal não influencia nas leituras de temperatura e deformação realizadas. Na Figura 5.5 é apresentado o espectro do sensor A08 ao longo do tempo, como exemplo, em que seta indica o avanço dos dias de ensaio.

Figura 5.5 - Espectro do sensor FBG na solução A08 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

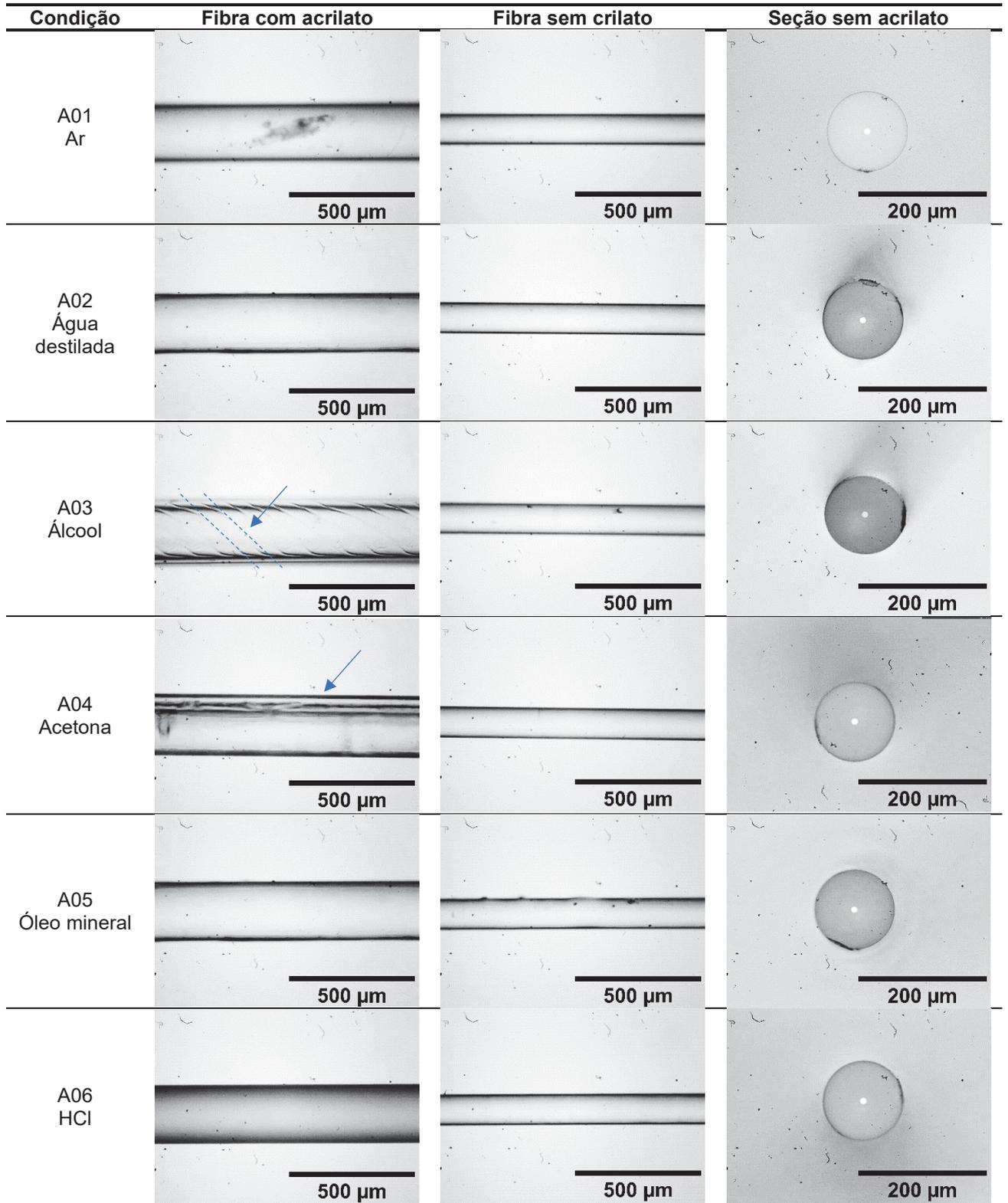
Fonte: Autoria própria

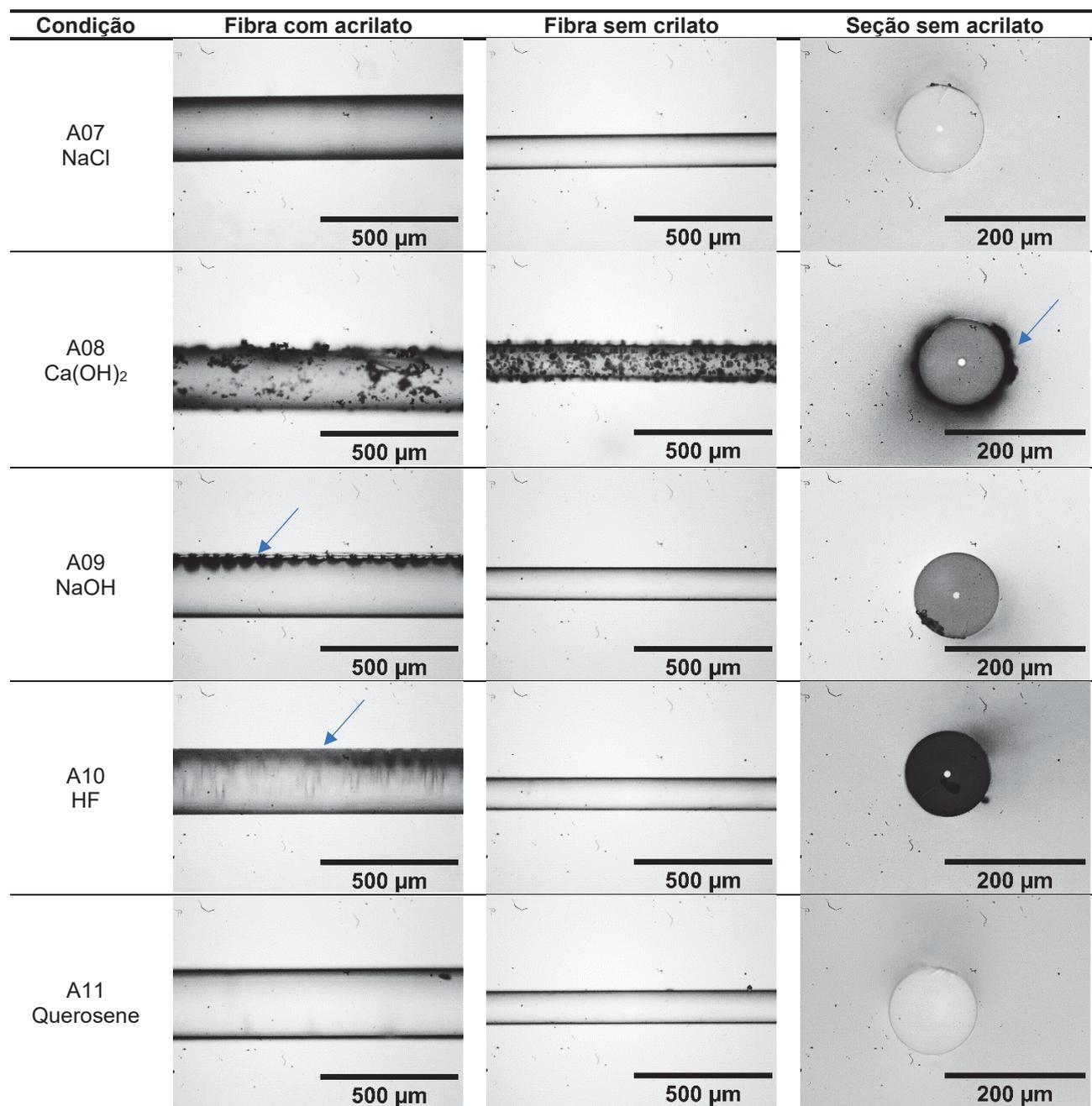
Da análise da Figura 5.5 pode-se concluir que o sensor A08 não apresentou perda significativa na intensidade do sinal, tampouco ocorreu o surgimento de modos de segunda ordem ao longo do tempo no espectro refletido pela rede de Bragg. Fato semelhante ocorreu nos demais sensores analisados. Também não foram observadas interferências nos espectros dos sensores imersos nas soluções, diferentemente do comportamento observado nos sensores embutidos no concreto. A variação ao longo do tempo para menores comprimentos de onda que pode ser observada na Figura 5.5 está relacionada à variação térmica do laboratório, que para os cálculos foi corrigida em função do sensor mantido no ar (A01). Isto posto, infere-se que o uso de soluções básicas e ácidas com concentração de até 0,1M não foram capazes de alterar a funcionalidade dos sensores.

Para verificar possíveis efeitos das soluções agressivas na superfície da fibra de vidro foram realizadas microscopias da região protegida por acrilato, da fibra ótica nua e da seção da fibra ótica sem acrilato – apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Microscopia ótica de transmissão dos sensores FBG mantidos em solução

Condição	Fibra com acrilato	Fibra sem acrilato	Seção sem acrilato
Fibra nova			





Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados, foi possível observar que algumas soluções foram capazes de causar alterações na proteção em acrilato. As amostras imersas em HCl (A06) e NaCl (A07) o revestimento passou a apresentar aparência opaca, ou seja, o acrilato que recobre a superfície da fibra ótica dificultou a passagem da luz do microscópio ótico o que indica que ocorreu uma interação do material com a solução agressiva.

Já o álcool isopropílico (A03) causou uma deformação inclinada do acrilato, indicando uma possível retração do material devido à exposição ao álcool. A acetona (A04), NaOH (A09)

e HF (A10), por sua vez, foram capazes de causar o descolamento do acrilato da superfície da fibra de vidro. E, por fim, o Ca(OH)_2 (A08) apresentou uma deposição de partículas sobre a camada de proteção que não foi possível de ser removida durante o procedimento de limpeza da fibra com água destilada.

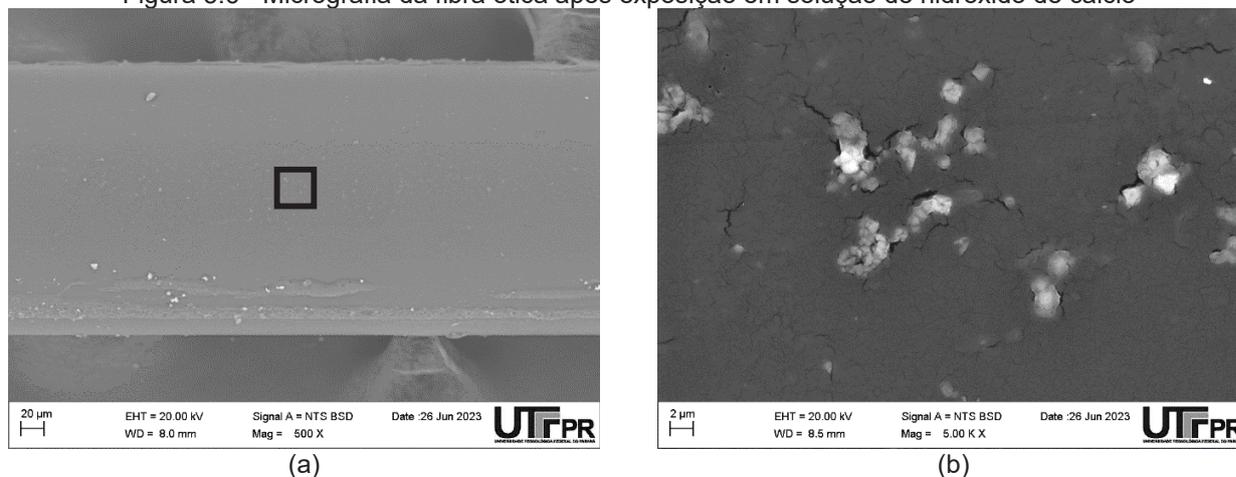
Na região da fibra nua, onde se encontra a rede de Bragg, uma alteração significativa foi observada apenas na fibra mantida em solução de Ca(OH)_2 (A08), na qual a superfície do vidro passou a apresentar pontos de corrosão química e precipitação de cristais (possivelmente de C-S-H ou portlandita). As amostras submersas em HF (A10) e NaOH (A09) - soluções que conhecidamente atacam o vidro - não apresentaram alterações.

Por fim, foi avaliada a variação do diâmetro da fibra nua ao final de 365 dias de ataque químico. Todas as fibras mantiveram um diâmetro próximo à $125\mu\text{m}$, exceto pela fibra mantida em HF (A10), que apresentou redução média de $3\mu\text{m}$ em seu diâmetro devido à corrosão química promovida pelo ácido. Destaca-se que, para remoção da casca de fibras óticas com HF para produção de sensores FBG corroídos, costuma-se utilizar concentrações próximas à 20M (FERNANDES, 2017; KUHNE, 2016), portanto, a redução observada com concentração de 0,1M não foi capaz de causar alterações significativas no sinal do sensor.

Com base nos resultados apresentados, observa-se que a solução de Ca(OH)_2 com concentração de 0,1M mostrou capacidade de reação com a sílica do vidro, resultando na formação de produtos aderidos na superfície da fibra ótica. Ainda que as soluções nas concentrações utilizadas não foram capazes de gerar qualquer alteração significativa nos espectros e na capacidade de medida dos sensores FBG, a amostra A08 com hidróxido de cálcio foi levada ao MEV para verificação do tipo de reação química ocorreu, conforme micrografias apresentadas na Figura 5.6. O quadrado preto indica a área de ampliação de 5000X da Figura 5.6b.

A partir da micrografia apresentada na Figura 5.6 foi possível confirmar a formação de pites de corrosão química com interação entre a superfície silicosa da fibra de vidro e o hidróxido de cálcio, indicando uma interação entre os materiais e susceptibilidade da fibra ótica em ambientes alcalinos. A partir da análise por EDS foi detectado baixo teor de silício, sugerindo que ocorreu apenas a precipitação de portlandita (mineral cristalino formado pelo hidróxido de cálcio).

Figura 5.6 - Micrografia da fibra ótica após exposição em solução de hidróxido de cálcio

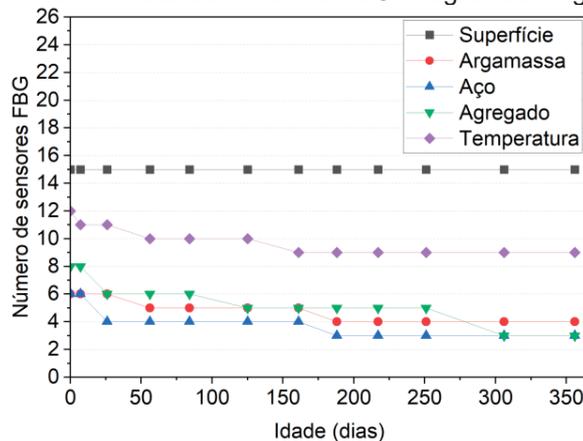


Fonte: Autoria própria

5.3.2 Avaliação da durabilidade de sensores em concreto

Conforme apresentado na Tabela 5.2, parte dos sensores internos embutidos nas amostras de concreto desta pesquisa apresentaram falhas, ainda que tenham sido encapsulados, conforme descrito na literatura. Na Figura 5.7 é possível observar o número de sensores válidos ao longo do tempo e pode-se concluir que os defeitos nos sensores ocorreram de maneira proporcional em todos os sensores internos, com uma maior incidência nos primeiros 60 dias. É possível observar também que nenhum sensor externo (superfície) apresentou falha ao longo dos 365 dias. Assim, é possível supor que os defeitos nos sensores foram ocasionados pela interação da fibra ótica com o concreto, seja devido à alcalinidade da solução de poros ou a ruptura na fibra causadas pela expansão das amostras.

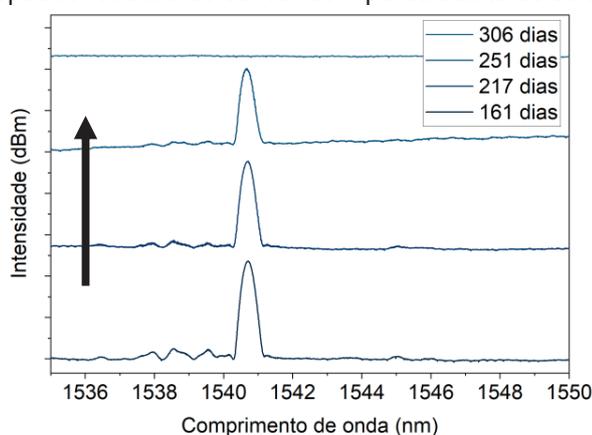
Figura 5.7 - Número total de sensores FBG íntegros ao longo do tempo



Fonte: Autoria própria

Para compreender as falhas que ocorreram nos sensores óticos, foi realizada uma análise do espectro refletido por esses sensores ao longo do tempo. Dois grupos principais de falhas foram identificadas: (i) sensores que apresentavam comportamento padrão, seguido de repentina ausência da rede de Bragg e; (ii) sensores passaram a apresentar oscilações no espectro em idades avançadas. Um exemplo do primeiro comportamento, com desaparecimento do sinal, pode ser observado na Figura 5.8, em um sensor que instrumentava a argamassa.

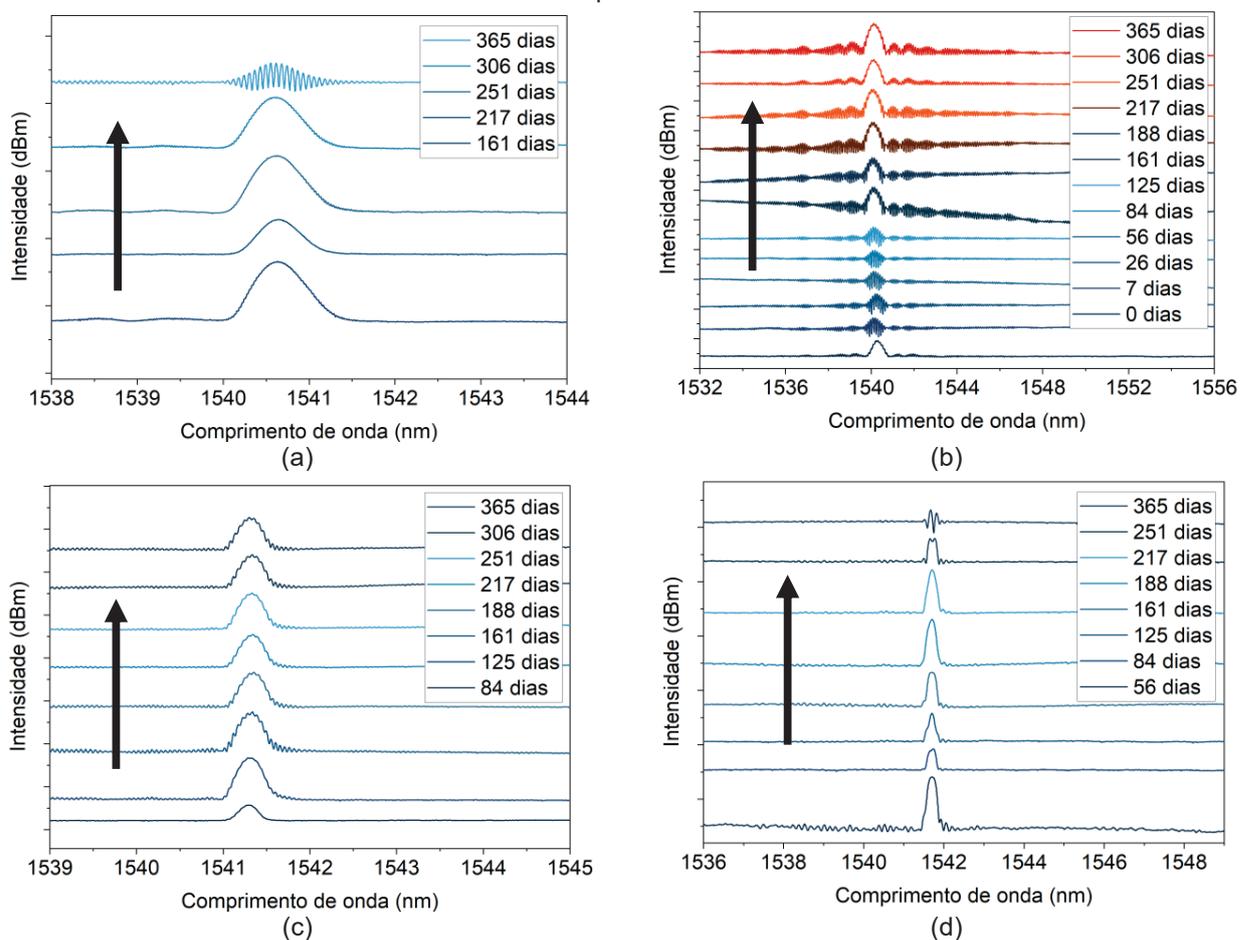
Figura 5.8 - Espectro refletido de sensor com perda súbita de sinal (argamassa)



Na Figura 5.8 pode-se observar que o sensor apresentou pico refletido pela rede de Bragg sem alterações até os 251 dias, mas aos 306 dias o espectro deixou de apresentar a reflexão. Este comportamento está associado ao rompimento da fibra ótica antes da rede de Bragg (entre o cabo de conexão e a FBG), o que ocasiona a súbita perda de sinal observada. Esse comportamento foi observado em todos os tipos de encapsulamentos.

Contudo, a maior parte dos sensores passaram a apresentar oscilações no espectro em idades avançadas antes da perda completa de sinal, conforme exposto na Figura 5.9, comportamento observado em todos os tipos de embutimento interno.

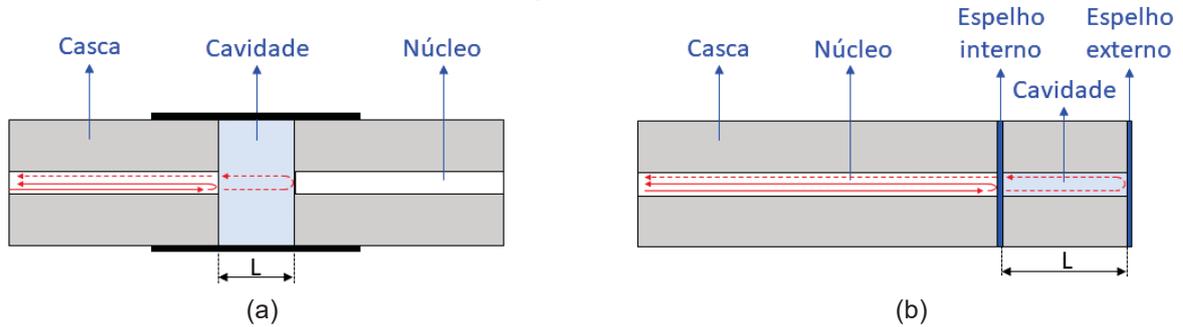
Figura 5.9 - Espectros refletidos de sensores FBG com interferência: (a) aço, (b) argamassa, (c) agregado e (d) temperatura



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar na Figura 5.9 que os sensores apresentaram interferências ondulatórias compatíveis com o fenômeno de cavidade ressonante. Ao alterar o caminho óptico de um feixe, altera-se também as condições de interferência construtiva e destrutiva no sistema. Este fenômeno é conhecido como Interferômetro Fabry-Perot (FPI) e pode funcionar como um tipo de sensor óptico pontual intrínseco ou extrínseco (RAO; RAN; GONG, 2017), conforme apresentado na Figura 5.10.

Figura 5.10 - Cavidade Fabry-Perot (a) intrínseco e (b) extrínseco



Fonte: Autoria própria

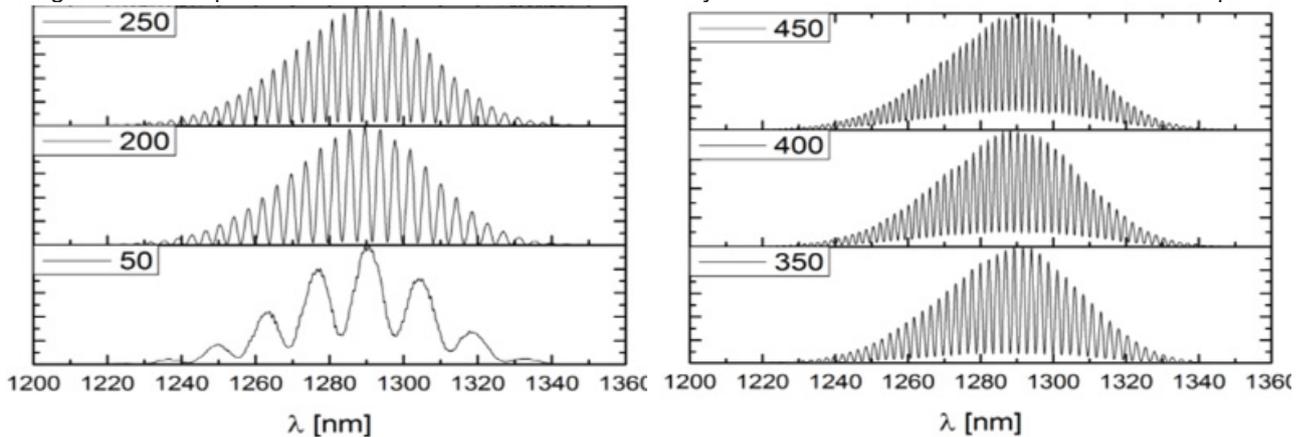
O FPI intrínseco, como o exemplo da Figura 5.10a, é denominado assim pois consiste em uma cavidade dentro da própria fibra óptica - que pode ser produzida por discontinuidades como cortes, bolhas e uso de fibras de diferentes diâmetros. Já o FPI extrínseco ocorre quando a cavidade se localiza fora da fibra óptica, como o exemplo da Figura 5.10b. Esse tipo de cavidade pode ser produzido depositando um filme fino no interior e na extremidade da fibra, o que gera uma cavidade entre duas superfícies espelhadas na própria fibra; ou ainda realizando a emenda na extremidade da fibra utilizando outra fibra com núcleo de diâmetro diferente (multimodo) ou com núcleo estruturado (múltiplos núcleos, birrefringente).

A diferença de fase (δ_{FPI}) no sinal de uma cavidade FPI pode ser calculada pela Equação 5.1, em que λ é o comprimento de onda central, η_{ef} é o índice de refração efetivo da cavidade e L o comprimento da cavidade (ISMAIL et al., 2020).

$$\delta_{FPI} = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \eta_{ef} \cdot L} \quad 5.1$$

Assim, um aumento gradual no comprimento da cavidade (L) gera uma redução proporcional na distância entre as oscilações no padrão de interferência (δ_{FPI}), conforme pode ser observado na Figura 5.11 em cavidades produzidas por Jędrzejewska-Szczerska (2014). No caso de sensores baseados em FPI, as discontinuidades costumam apresentar espaçamentos na ordem de micrômetros.

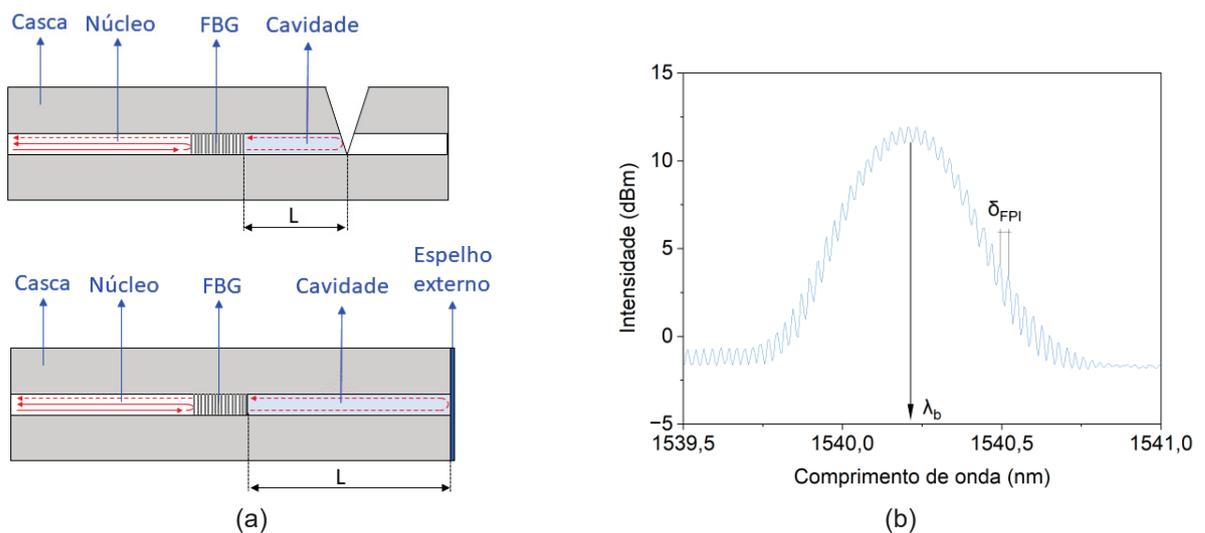
Figura 5.11 - Espectro normalizado de uma cavidade Fabry-Perrot de dimensões variando de 50 a 450 μm



Fonte: Jędrzejewska-Szczerska (2014)

É possível ainda a criação de uma cavidade associada à um sensor FBG, seja pela geração de uma reflexão na extremidade da fibra, normalmente produzida com filmes finos (FPI extrínseco), ou o corte parcial da seção da fibra antes do sensor (FPI intrínseco). O efeito de ressonância gerado pela cavidade se soma ao espectro refletido da FBG, que assume a função de um dos espelhos internos, conforme ilustração e espectro apresentados na Figura 5.12.

Figura 5.12 - Cavidade Fabry-Perrot (a) associada à uma FBG e (b) seu espectro em reflexão

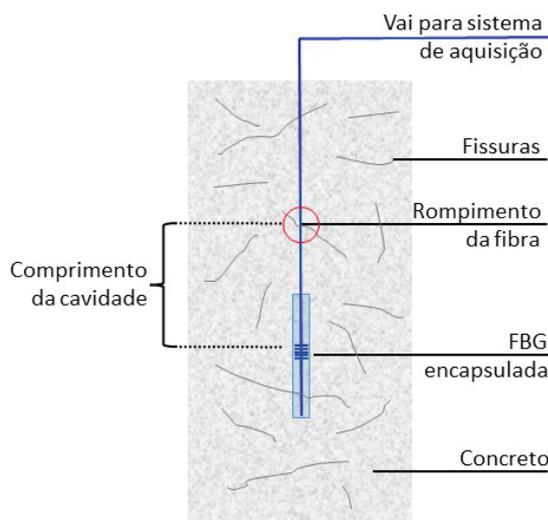


Fonte: Autoria própria

No espectro refletido, λ_b é o comprimento de onda da rede de Bragg e δ_{FPI} é a diferença de fase gerada pela cavidade formada. Assim, para explicar as oscilações no espectro observadas nos sensores FBG para monitoramento interno das amostras de

concreto, a hipótese é que ocorreu a quebra da fibra antes ou após o sensor FBG, na região do cabo da fibra nua, gerando uma cavidade, que se manteve alinhada devido ao concreto que fixou a fibra ótica na mesma posição (Figura 5.13).

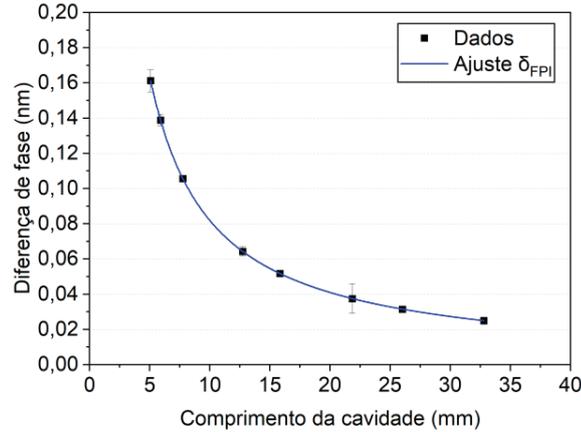
Figura 5.13 - Exemplo de formação de cavidade devido à fissuração da amostra antes da FBG



Fonte: Autoria própria

A formação de uma cavidade extrínseca é pouco provável, pois a extremidade do sensor estava protegida, a ponta da fibra precisaria apresentar um corte perpendicular (clivagem) à 90° e o filme formado precisaria ter alta capacidade de reflexão, sendo que normalmente são utilizados filmes metálicos para esta finalidade (RAO; RAN; GONG, 2017). Ao longo do tempo, não foi possível verificar o aumento ou a redução do comprimento das cavidades, sendo observado o mesmo valor de diferença de fase para cada sensor ao longo de um ano. Assim, mesmo com as amostras em expansão livre, não ocorreu o aumento do tamanho da cavidade. Para verificar o comprimento das cavidades (L), foi utilizada a Equação 5.1, considerando o comprimento de onda (λ) como 1540,3 e o índice de refração da fibra (n_{ef}) como 1,447 – conforma apresentado na Figura 5.14.

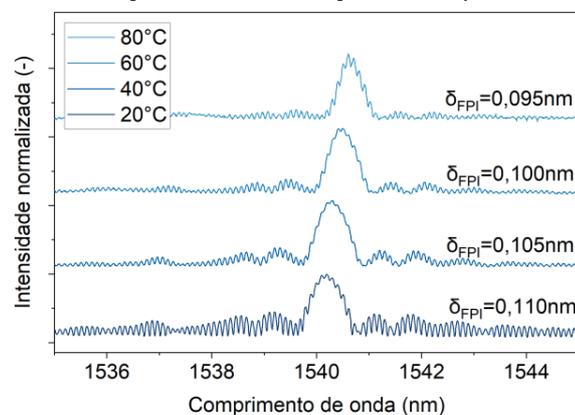
Figura 5.14 - Diferença de fase e comprimento das cavidades



Fonte: Autoria própria

A partir da estimativa do comprimento das cavidades, é possível verificar que a distância entre o sensor e o ponto de reflexão variou de 5 a 33 mm para os sensores encapsulados. Estes valores indicam que o local de reflexão se encontra próximo à região do encapsulamento, o que corrobora a hipótese de que a interferência dos espectros refletidos foi causada, provavelmente, devido à um dano na fibra fora da região do sensor FBG, em uma região que se encontrava dentro do concreto. Fatores como a expansão da amostra ou proximidade com agregados graúdos podem ter gerado esforços de tração ou propagação de fissuras sobre a fibra ótica que passou a sofrer esforço de cisalhamento, ocasionando a criação de descontinuidades com consequente formação da cavidade Fabry-Perot. Finalmente, para se confirmar o efeito de cavidade, os sensores que apresentaram tal comportamento foram aquecidos para que fosse confirmada a variação na diferença de fase devido à variação térmica, que foi confirmada conforme Figura 5.15.

Figura 5.15 - Diferença de fase em função da temperatura da amostra



Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados da Figura 5.15, nota-se que o aquecimento da amostra gerou uma redução na diferença de fase devido à expansão do material e aumento da cavidade, confirmando, portanto, o rompimento da fibra devido ao elevado grau de fissuração da amostra. Assim, tanto as interferências no sinal das fibras quanto os rompimentos dos cabos de fibra ótica foram ocasionadas pela ausência de proteção ao longo do cabo. Ainda que a fibra ótica seja revestida por uma camada de acrilato, este não apresenta resistência compatível com o ambiente agressivo e esforços gerados no interior do concreto. Vale destacar, mais uma vez, que grande parte dos estudos realizados em laboratório são conduzidos sem a proteção da fibra ou encapsulamento do sensor FBG, são realizados por períodos reduzidos (até 90 dias), e os sensores costumam ser aplicados apenas na superfície das amostras (CAMPOPIANO et al., 2014; FAN et al., 2019; GAO et al., 2011; GRATTAN et al., 2009), e por esses fatores as mesmas falhas não são observadas.

A partir dos resultados de monitoramento de amostras de concreto, observou-se que os sensores aplicados na superfície, por não entrarem em contato com a solução alcalina dos poros do concreto, não mantêm contato direto com agregados e sofrem esforços em direções diferentes das instrumentadas, não apresentaram nenhum defeito ao longo de 1 ano mantidas à 38°C.

Para solucionar os problemas do ataque do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente no concreto e os esforços mecânicos ao longo do cabo da fibra, o encapsulamento dos sensores e do cabo deve ser feito sem que exista qualquer contato entre a matriz cimentícia e qualquer trecho da fibra ótica. Um sistema de proteção completo do sensor também beneficiaria os sistemas de monitoramento externos, que em estruturas reais também podem ser afetados por intempéries e ações mecânicas. Por este motivo, Grattan e Meggitt (1999) afirmaram que, para aplicações de sensores óticos no interior de estruturas, o contato direto entre a fibra e o concreto precisa ser eliminado.

Neste sentido, fabricantes internacionais de componentes óticos fornecem opções de revestimentos em materiais termoplásticos como o fluoreto de polivinilideno que possui alta resistência à ataques químicos, e o Hytrel® (termoplástico de poliéster) que possui alta flexibilidade e resistência térmica. Outra opção seria o uso de tubos de polipropileno com camadas de reforço em Kevlar® e jaqueta externa de PVC, similar aos cabos ilustrados na Figura 2.3. Estes revestimentos poderiam ser utilizados para proteção de toda a extensão do cabo, evitando, assim, o contato com o concreto.

Para a região específica dos sensores, os métodos de encapsulamento FBG propostos nesta pesquisa apresentados na Figura 4.14 demonstraram bom desempenho, uma vez que protegeram de forma eficaz o sensor e permitiram a avaliação das deformações internas dos concretos afetados por RAS (resultados da Figura 4.46).

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no estudo da durabilidade de sensores FBG em soluções agressivas e de sensores encapsulados embutidos no interior de amostras de concreto, é possível concluir que:

- As soluções químicas utilizadas, em especial ácidos e bases em concentração de 1M, não afetaram a funcionalidade dos sensores FBG ao longo de 1 ano de monitoramento em temperatura ambiente. A partir das microscopias realizadas, foi possível confirmar que o hidróxido de cálcio apresentou capacidade de fixação ou reação na superfície da fibra ótica. Este fenômeno sugere que a solução alcalina dos poros do concreto pode possuir capacidade de reagir com a fibra ótica.

- O sinal dos sensores FBG imersos em soluções agressivas apresentaram variação no comprimento de onda. Esse comportamento não era esperado, uma vez que foi realizada compensação térmica. Contudo, os desvios observados ao longo de 1 ano de ensaio foram próximos à resolução do equipamento e não influenciaram de forma significativa as leituras realizadas. Com relação à intensidade do sinal, todos os sensores apresentaram flutuações proporcionais entre si, que estão associadas à estabilidade da fonte ótica utilizada na interrogação dos sinais.

- O encapsulamento dos sensores FBG localizados no interior do concreto foi eficaz na proteção da região do sensor. Contudo, não foi realizada a proteção ao longo dos cabos de fibra nua, que ficaram imersos e em contato direto com o concreto, ainda que apresentasse o revestimento em acrilato. Com o passar do tempo, parte dos sensores passaram a apresentar um padrão de interferência no sinal, indicando a formação de cavidades ressonantes no interior das fibras óticas, conhecidas como interferência Fabry-Perot. A partir da estimativa da dimensão dessas cavidades, foi possível deduzir que o problema ocorreu ao longo do

comprimento do cabo ótico, devido ao rompimento da fibra causado pela fissuração da amostra, típica de um concreto em desenvolvimento de reação álcali sílica.

- Assim, os cabos de fibra nua, mesmo com a camada de proteção em acrilato, sofreram danos em função da agressividade e alcalinidade do concreto e às deformações internas que passaram a ocorrer devido à RAS. Para mitigar esse problema, propõe-se o uso de sistemas de proteção com tubos plásticos de alta resistência química e alta flexibilidade, abrangendo toda a extensão dos cabos. Esse sistema de proteção impediria o contato direto do concreto com a superfície da fibra ótica, e evitaria a ocorrência do fenômeno descrito.

A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os sensores em fibra ótica são precisos e adequados para monitorar propriedades do concreto, porém são frágeis e podem ainda interagir quimicamente com o hidróxido de cálcio do concreto. Dessa forma, para manter a funcionalidade ao longo do tempo, faz-se necessário o uso de um sistema de proteção ao longo de toda a fibra.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA TESE

6.1 Conclusões gerais

Esta tese teve como objetivo desenvolver meios de aplicação de sensores em fibra ótica com rede de Bragg (FBG) para a avaliação da reação álcali-sílica. O estudo foi dividido em três etapas, e a seguir estão apresentadas as conclusões do trabalho.

A primeira etapa do estudo visou fabricar sensores em fibras óticas baseados em rede de Bragg, e avaliar medidas realizadas por FBG e sensores comerciais para calcular o módulo estático e dinâmico das vigas de argamassa por diferentes métodos. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o uso de fibras óticas monomodo padrão (G652), após o processo de hidrogenação em câmara, são adequadas ao processo de fabricação de sensores FBG; apresentando também vantagens econômicas.

Os resultados experimentais do processo de gravação e calibração dos sensores apresentaram uma baixa variação em comparação com os modelos teóricos. Observou-se que os métodos e sensores utilizados para medir as propriedades dos materiais podem influenciar significativamente nos resultados obtidos. Isso ressalta a vantagem do uso de sensores eletrônicos, que permitem medidas em tempo real e eliminam a influência do operador nas leituras realizadas.

Foi possível observar também que a alteração na geometria e no tipo de material tem impacto direto nos resultados de módulo elástico obtidos. A partir dos resultados, constatou-se que os sensores em fibra ótica com rede de Bragg (FGB) apresentaram resultados sem diferença estatisticamente significativa em comparação com os extensômetros. Além disso, os dados apresentaram baixa dispersão, alta precisão e facilidade de aplicação. Durante os ensaios, nenhum sensor apresentou comportamento anômalo, falha no registro de dados ou dificuldade de aplicação. Deste modo, resta comprovada a eficácia do uso de sensores óticos na avaliação de propriedades mecânicas de materiais de construção, além de outras vantagens oferecidas pelo uso desses sensores.

Na segunda etapa do estudo, realizou-se a caracterização de um agregado reativo e medidas de expansão em concreto por técnicas tradicionais, sensores FBG e ensaios complementares. A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que o ensaio de petrografia demonstrou o melhor potencial de identificação de fases minerais reativas, e os ensaios realizados em amostras de concreto demonstraram uma boa confiabilidade na

classificação da reação. Os ensaios de expansão em amostras cilíndricas apresentaram resultados superiores àqueles encontrados nos ensaios realizados em amostras prismáticas, devido à influência da orientação da moldagem das amostras. Os ensaios complementares SDT, DRI e MEV desempenharam papel importante na confirmação do mecanismo de reação, na avaliação do grau de degradação do concreto e na confirmação da RAS. Já o uso do sensor FBG no monitoramento da expansão se mostrou eficiente, apresentando expansões equivalentes à obtidas com pinos. Os sensores FBG fixados nas barras de aço e nos agregados apresentaram expansão inferiores às externas, o que demonstra a versatilidade e potencial da instrumentação por sensores óticos. Observou-se a necessidade de estabelecer um banco de dados consolidado sobre a reatividade de agregados nacionais, bem como proposição de fatores para comparação de resultados obtidos em amostras de diferentes geometrias.

A terceira etapa deste estudo teve como objetivo avaliar a durabilidade de sensores FBG em soluções agressivas e no interior de amostras de concreto. A partir dos resultados obtidos é possível concluir que as soluções químicas utilizadas não foram capazes de afetar a funcionalidade dos sensores FBG ao longo de um ano, apesar do hidróxido de cálcio ter apresentado capacidade de fixação na superfície das fibras óticas. Embora o encapsulamento realizado na região dos sensores FBG tenha sido efetivo na proteção da região do sensor, a ausência de proteção ao longo dos cabos de fibra nua resultou no rompimento parcial das fibras, que passaram a apresentar um padrão de interferência no sinal, coerente com a formação de cavidades ressonantes. Portanto, propõe-se o uso de sistemas de proteção com tubos plásticos de alta resistência química e alta flexibilidade em toda a extensão dos cabos, impedindo o contato direto do concreto com a superfície da fibra ótica, garantindo seu funcionamento à longo prazo.

Isto posto, o estudo realizado contribuiu para preencher diversas lacunas de conhecimento acerca da RAS e seus mecanismos de ação, bem como fornece uma detalhada metodologia para a produção de sensores FBG no monitoramento estrutural, abordando sua correta aplicação e durabilidade.

6.2 Sugestão de trabalhos futuros

O estudo e desenvolvimento sensores óticos para o monitoramento de estruturas de concreto desempenha papel fundamental no avanço da indústria da construção, e apresenta

um vasto potencial de aplicação, considerando todas as vantagens associadas ao seu uso. Portanto, é importante e recomendável que pesquisas nessa área continuem sendo desenvolvidas e aprofundadas. Com base nisso, são feitas a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliação de ataques conjugados de reação álcali sílica com ataque por sulfatos (interno e externo) e gelo-degelo; além da proposição de limites para estes ataques conjugados com a RAS;
- Avaliação do desempenho e métodos de cálculos de sistemas de reforço e de tratamentos mitigadores para estruturas afetadas por RAS;
- Investigação da capacidade de transferência de tensão devido ao avanço da RAS para armaduras e o efeito do confinamento de armaduras no comportamento estrutural;
- Desenvolvimento de sensores FBG multiplexados para leituras simultâneas de diferentes parâmetros físicos, bem como realização de medidas dinâmicas em concretos afetados por RAS;
- Comparação de sensores óticos baseados em FBG e sensores distribuídos baseados no espalhamento de luz;
- Aplicação de sensores corroídos com nanopartículas aplicados para detecção da composição da solução de poros, pH, teor de umidade e presença de íons agressivos.

6.3 Publicações realizadas no período

MACIOSKI, G.; SANCHEZ, L. F. M.; MEDEIROS, M. H. F. **Measuring alkali-silica reaction expansion in concrete with optical fiber sensors**. 17th International conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. Canada, 2024.

PREDIGER, N. C.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, T. R.; FARIA, R. C.; BARRETO, R. C.; KAMIKAWACHI, R. C. Etched Saturated Fiber Bragg Gratings for Refractive Index Measurements. **IEEE Sensors Journal**. 2023.

SOTO, N. T. A.; MACIOSKI, G. HOPPE FILHO, J.; KLEIN, N. S. Mix design of eco-efficient high-strength mortars optimized by compressible packing model. **IBRACON Structures and Materials Journal**. 2023.

BRUSAMARELLO, B.; SILVEIRA, E. T.; DREYER, U. J.; MACIOSKI, G.; WEBER, G. H.; GOMES, D. F.; BRUNETTO, G. A.; MARTELLI, C.; SILVA, J. C. C. **Técnica para aumento da sensibilidade de sensoriamento acústico distribuído aplicado no monitoramento de barragens**. XXVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE). Brasília. 2023.

MACIOSKI, G.; LANGARO, E. A.; GOBBI, A.; CAPRARO, A. P. B.; MEDEIROS, M. H. F. Reações expansivas em barragens de concreto causadas por agregados reativos. **Concreto & Construção**, v. 109, p. 56-62, 2023.

SOTO, N. T. A.; MACIOSKI, G.; ARAUJO, E. C.; HOPPE FILHO, J.; KLEIN, N. S. Measuring packing density and water demand of Portland cement and SCMs by the mixing energy method. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 16, p. e16507, 2023.

CUNHA ARAÚJO, E.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Concrete surface electrical resistivity: Effects of sample size, geometry, probe spacing and SCMs. **Construction And Building Materials**, v. 324, p. 126659, 2022.

MACIOSKI, G.; SOTO, N. T. A.; MEDEIROS, M. H. F.; JANH, L. C.; OLIVEIRA, F. G. R. Influência do empacotamento e do teor de agregados nas propriedades de concretos permeáveis de cimento Portland. **Revista Engenharia Civil**, v. 2022, p. 5-18, 2022.

MACIOSKI, G.; SOTO, N. T. A.; MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; ARAÚJO, M. S.; CERRI, J. A. Portlandite consumption by red ceramic waste due to alkali activation reaction. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 7-21, 2021.

MACIOSKI, G.; SOTO, N. T. A.; FREITAS, L. S.; SILVA, R. C.; MEDEIROS, M. H. F. Análise Hierárquica de Processos (AHP) Aplicada à Seleção de Sistemas de Revestimento de Fachadas. **Revista De Engenharia E Pesquisa Aplicada**, v. 6, p. 34-43, 2021.

MARTINS, M. C.; LANGARO, E. A.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. External ammonium sulfate attack in concrete: Analysis of the current methodology. **Construction And Building Materials**, v. 277, p. 122252, 2021.

MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, V.; MEDEIROS, M. H. F. Strain, natural frequency, damping coefficient and elastic modulus of mortar beams determined by fiber Bragg grating (FBG) sensors. **Revista IBRACON De Estruturas E Materiais**, v. 14, p. 1, 2021.

CALVO VALDÉS, A.; MEDEIROS, M. H. F.; MACIOSKI, G. Sensor de corrosão para monitoramento de estruturas de concreto armado: Testes em corpos de prova de concreto armado. **Revista Alconpat**, v. 11, p. 1, 2021.

AMARAL, M.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. **Materia-Rio de Janeiro**, v. 26, p. 17, 2021.

WOSNIACK, L. M.; REAL, L. V.; SILVA, M. D.; MACIOSKI, G.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 321-340, 2021.

BRANDÃO CAPRARO, A. P.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. Effect of aggregate contamination with pyrite on reinforcement corrosion in concrete. **Engineering Failure Analysis**, 105116, 2020.

NARLOCH, D. C.; PASCHUK, S. A.; CORREA, J. N.; TORRES, C. A. M. P.; LARA, A. L.; CASALI, J. M.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; PERNA, A. F. N. Elementary characterization of samples of Portland cement, natural gypsum and phosphogypsum mortars from Brazil. **Brazilian Journal Of Radiation Sciences**, v. 7, p. 1-12, 2019.

PEREIRA, I. C.; CARVALHO, K. Q.; PASSIG, F. H.; FERREIRA, R. C.; RIZZO-DOMINGUES, R. C. P.; HOPPEN, M. I.; MACIOSKI, G.; NAGALLI, A.; PERRETTO, F. Thermal and Thermal-acid treated sewage sludge for the removal of dye reactive Red 120: characteristics, kinetics, isotherms, thermodynamics and Response Surface Methodology design. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, p. 7233-7246, 2018.

FERNANDEZ, L. P.; MIKOWSKI, P. C. B.; MACIOSKI, G.; NAGALLI, A.; FREIRE, F. B. Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. **Materia-Rio de Janeiro**, v. 23, p. 1, 2018.

PREDIGER, N. C.; MACIOSKI, G.; BARRETO, R. C.; KAMIKAWACHI, R. C. **Saturated Etched Fiber Bragg Gratings**. Conference: 20º Simpósio Brasileiro De Micro-Ondas E Optoeletrônica. Natal. 2022.

SOTO, N. T. A.; MACIOSKI, G. HOPPE FILHO, J.; KLEIN, N. S. **Caracterização físico-química da sílica ativa para aplicação como material cimentício suplementar**. Congresso de Construção Civil UnB, 2022, Brasília. Anais do Congresso de Construção Civil UnB, 2022.

ARAUJO, E. C.; SURMAS, J. S.; MACIOSKI, G.; PIERALISI, R.; MEDEIROS, M. H. F. **Influência da incorporação de grafeno e sílica ativa nas propriedades físicas e de durabilidade de argamassas cimentícias**. 4º Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções, 2022, Ilhéus. Anais do 4º Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções, 2022.

MACIOSKI, G.; SANCHEZ, L. F. M.; BAO, X.; MEDEIROS, M. H. F. **Monitoring alkali-aggregate reaction (AAR) induced expansion through the use of fiber Bragg grating sensors**. 16th International conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. Lisboa, Portugal, 2021. Anais do 16th International conference on Alkali Aggregate Reaction in Concrete. Lisboa, Portugal, 2021.

MARTINS, M. C.; LANGARO, E. A.; PINTO, M. A. R.; VALDEZ, A. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **Influência de adições minerais nas propriedades mecânicas do concreto submetido a um microclima agressivo de sulfato de amônio**. 61 Congresso Brasileiro de Concreto, 2019, Fortaleza. Anais do 61 Congresso Brasileiro de Concreto, 2019.

PINTO, M. A. R.; VALDEZ, A. C.; LANGARO, E. A.; MARTINS, M. C.; MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **Ataque interno por sulfato de amônio em concretos com incorporação de adições pozolânicas de elevada reatividade**. Congresso Latinoamericano de Patología de Construcción, 2019, Chiapas. Anais do XV Congresso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, 2019. v. 2.

MACIOSKI, G.; MEDEIROS, M. H. F. **Monitoramento de estruturas de concreto com rede de Bragg em fibra ótica**. 3o Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas

de Concreto Armado, 2018, São Carlos - SP. Anais do 3o Encontro Luso-Brasileiro de Degradação em Estruturas de Concreto Armado, 2018.

MACIOSKI, G.; LIMA, A. J. M.; SILVA, A. L. C.; MEDEIROS, M. H. F. **Reação álcali-agregado em areias artificiais de Curitiba-PR.** I Simpósio Paranaense de microscopia eletrônica e microanálise. Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR. 2018. Anais do I Simpósio Paranaense de microscopia eletrônica e microanálise. ISBN 978-85-7335-321-1. 2018

REFERÊNCIAS

AASHTO. **T303 - Standard Method of Test for Accelerated Detection of Potentially Deleterious Expansion of Mortar Bars Due to Alkali–Silica Reaction**. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2000.

ABDELRAHMAN, M.; ELBATANOUNY, M. K.; ZIEHL, P.; FASL, J.; LAROSCHE, C. J.; FRACZEK, J. Classification of alkali–silica reaction damage using acoustic emission: A proof-of-concept study. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 95, p. 406–413, 2015. . Acesso em: 28 abr. 2019.

ABNT. **NBR 7215 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996. a.

ABNT. **NBR NM 58 - Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996. b.

ABNT. **NBR NM 67 - Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

ABNT. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003. a.

ABNT. **NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**, 2003. b.

ABNT. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

ABNT. **NBR 8552 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ABNT. **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. a.

ABNT. **NBR 7211 - Agregado para concreto - Especificação**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. b.

ABNT. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

ABNT. **NBR 7680 - Concreto - extração, preparo, análise de testemunhos de estruturas de concreto. Parte 1: Resistência à compressão axial**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015.

ABNT. NBR 15577-1 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. a.

ABNT. NBR 15577-4 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. b.

ABNT. NBR 15577-3 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. c.

ABNT. NBR 15577-2 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. d.

ABNT. NBR 15577-5 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. e.

ABNT. NBR 15577-6 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. f.

ABNT. NBR 15577-7 - Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. g.

ABNT. NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos, 2018. h.

ABNT. NBR 5739 - Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, 2018. i.

ABNT. NBR 16697 - Cimento Portland - Requisitos, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2018. j.

ABNT. NBR 16916 - Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, 2021. a.

ABNT. NBR 16917 - Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água, 2021. b.

ABNT. NBR 16972 - Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios, 2021. c.

ABNT. **NBR 16973 - Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**, 2021. d.

ACI. **228 - Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures**, American Concrete Institute, 2013.

AHMED, H.; ZAHEDI, A.; SANCHEZ, L. F. M.; FECTEAU, P. Condition assessment of ASR-affected reinforced concrete columns after nearly 20 years in service. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 347, p. 128570, 2022.

ALAMPALLI, S.; MOREAU, W. J. **Inspection, evaluation and maintenance of suspension bridges : case studies**. 1. ed. Florida: Taylor and Francis, 2016. . Acesso em: 10 set. 2018.

ALFAYA, A. A. S.; KUBOTA, L. T. A utilização de materiais obtidos pelo processo de sol-gel na construção de biossensores. **Quimica Nova**, [s. l.], v. 25, n. 5, p. 835–841, 2002.

ALLWOOD, J. M.; ASHBY, M. F.; GUTOWSKI, T. G.; WORRELL, E. Material efficiency: providing material services with less material production. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 371, n. 1986, p. 20120496, 2013.

ALMUBAIED, O.; CHAI, H. K.; ISLAM, M. R.; LIM, K.; TAN, C. G. Monitoring Corrosion Process of Reinforced Concrete Structure Using FBG Strain Sensor. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. l.], v. 66, n. 8, p. 2148–2155, 2017.

ALSALMAN, A.; DANG, C. N.; PRINZ, G. S.; HALE, W. M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 153, p. 918–928, 2017.

ANA. **Relatório de segurança de barragens 2021**. 2021. ed. Brasília: ANA, 2021. v. 1

ANDRADE, R. G. M. De; TRAUTWEIN, L. M.; BITTENCOURT, T. N. Comparison and calibration of numerical models from monitoring data of a reinforced concrete highway bridge. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 121–138, 2013.

ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. Em: INFORMATIVO DA PEDRA SUL MINERAÇÃO JUIZ DE FORA 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo

ANTUNES, P.; TRAVANCA, R.; RODRIGUES, H.; MELO, J.; JARA, J.; VARUM, H.; ANDRÉ, P. Dynamic Structural Health Monitoring of Slender Structures Using Optical Sensors. **Sensors**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 6629–6644, 2012.

ANUGONDA, P.; WIEHN, J. S.; TURNER, J. A. Diffusion of ultrasound in concrete. **Ultrasonics**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 429–435, 2001.

AS. **1141.60.1 - Methods for sampling and testing aggregates Potential alkali-silica reactivity - Accelerated mortar bar method**, Australian Standards, 2014. a.

AS. **1141.60.2 - Methods for sampling and testing aggregates Potential alkali-silica reactivity - Concrete prism method**, Australian Standards, 2014. b.

ASTM. **C289 - Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)**, American Society for Testing and Materials, 2007.

ASTM. **E1875 - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Sonic Resonance**, American Society for Testing and Materials, 2008. a.

ASTM. **C295 - Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete**, American Society for Testing and Materials, 2008. b.

ASTM. **C597 - Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete**, American Society for Testing and Materials, 2009.

ASTM. **C1567 - Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method)**, American Society for Testing and Materials, 2013.

ASTM. **C215 - Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens**, American Society for Testing and Materials, 2014. a.

ASTM. **C1260 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)**, American Society for Testing and Materials, 2014. b.

ASTM. **E1876 - Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**, American Society for Testing and Materials, 2015.

ASTM. **C1105 - Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction**, American Society for Testing and Materials, 2016.

ASTM. **C1293 - Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to AlkaliSilica Reaction**, American Society for Testing and Materials, 2018.

ASTM. **C586 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method)**, American Society for Testing and Materials, 2019.

ASTM. **C 1778 - Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, American Society for Testing and Materials, 2020. a.

ASTM. **C1778 - Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, American Society for Testing and Materials, 2020. b.

BAHR, O.; SCHAUMANN, P.; BOLLEN, B.; BRACKE, J. Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations. **Materials & Design**, [s. l.], v. 45, p. 421–429, 2013.

BANDT NETO, M. **Sensor de Deformação Baseado em FBG com Compensação de Temperatura Encapsulado em Alumínio**. 2018. Dissertação de mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2018.

BAO, Y.; MENG, W.; CHEN, Y.; CHEN, G.; KHAYAT, K. H. Measuring mortar shrinkage and cracking by pulse pre-pump Brillouin optical time domain analysis with a single optical fiber. **Materials Letters**, [s. l.], v. 145, p. 344–346, 2015. . Acesso em: 29 abr. 2020.

BARRETO SANTOS, M.; DE BRITO, J.; SANTOS SILVA, A. A Review on Alkali-Silica Reaction Evolution in Recycled Aggregate Concrete. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 11, p. 2625, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/2625>>

BASTGEN, K. J.; HERMANN, V. Experience made in determining the static modulus of elasticity of concrete. **Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 357–364, 1977.

BATISTA, A. L.; GOMES, J. P. CHARACTERISTIC BEHAVIOUR OF THE PORTUGUESE LARGE CONCRETE DAMS BUILT WITH GRANITE AGGREGATES AND AFFECTED BY ASR. Em: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION 2016, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ICAAR, 2016.

BATISTA, C. F. L. **Encapsulamento de redes de bragg em fibra Ótica**. 2017. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2017.

BATTAGIN, A.; SILVEIRA, A. L.; MUNHOZ, F.; BATTAGIN, I. A evolução da cultura da prevenção da reação álcali-agregado no mercado nacional. **Concreto & Construções**, [s. l.], p. 39–43, 2016.

BCA. **The diagnosis of alkali silica reaction – report of a working party**. Crowthorne, England.

BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E.; POLDER, R. **Corrosion of steel in concrete : prevention, diagnosis, repair**. Weinheim: Wiley, 2013.

BÉRUBÉ, M. A.; TREMBLAY, C.; FOURNIER, B.; THOMAS, M. D.; STOKES, D. B. Influence of lithium-based products proposed for counteracting ASR on the chemistry of pore

solution and cement hydrates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 9, p. 1645–1660, 2004.

BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná**. [s.l: s.n.].

BEZERRA, A.; TROTTIER, C.; SANCHEZ, L. The Use of Artificial Intelligence for Assessing an Overpass affected by Alkali-Silica Reaction (ASR). Em: INTERNATIONAL CONFERENCE IN BRIDGE MAINTENANCE, SAFETY AND MANAGEMENT 2022, Barcelona, Spain. **Anais...** Barcelona, Spain

BIS. **7493 - Guide to the interpretation of petrographical examinations for alkali-silica reactivity**, 2018.

BLIGHT, G. E.; ALEXANDER, M. G. **Alkali-Aggregate Reaction and Structural Damage to Concrete**. 1. ed. London: CRC Press, 2011.

BOHDAN, S.; TOMASZ, K. Determination of the influence of cylindrical samples dimensions on the evaluation of concrete and wall mortar strength using ultrasound method. Em: PROCEDIA ENGINEERING 2013, **Anais...** : Elsevier Ltd, 2013. Acesso em: 7 jun. 2020.

BOUKARI, Y.; BULTEEL, D.; RIVARD, P.; ABRIAK, N. Combining nonlinear acoustics and physico-chemical analysis of aggregates to improve alkali–silica reaction monitoring. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 67, p. 44–51, 2015. . Acesso em: 28 abr. 2019.

BROADBAND NOW. **Fiber-optic internet in the United States**. 2020. Disponível em: <<https://broadbandnow.com/Fiber>>. Acesso em: 24 maio. 2020.

BUCHER, K.; GRAPES, R. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

BULTEEL, D.; GARCIA-DIAZ, E.; VERNET, C.; ZANNI, H. Alkali–silica reaction: A method to quantify the reaction degree. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 1199–1206, 2002.

BURAS, M. **Aplicação de sensores distribuídos de fibra ótica em um modelo experimental para monitoramento de movimentos de massa**. 2013. Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2013.

CAI, D.; REN, L.; ZHAO, H.; XU, C.; ZHANG, L.; YU, Y.; WANG, H.; LAN, Y.; ROBERTS, M. F.; CHUANG, J. H.; NAUGHTON, M. J.; REN, Z.; CHILES, T. C. A molecular-imprint nanosensor for ultrasensitive detection of proteins. **Nature Nanotechnology**, [s. l.], v. 5, n. 8, p. 597–601, 2010. . Acesso em: 15 jan. 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8. ed. [s.l.] : Wiley, 2009.

CAMPOPIANO, S.; IADICICCO, A.; MESSINA, F.; FERONE, C.; CIOFFI, R. Measurement of temperature and early age shrinkage of alkali activated metakaolin using fiber Bragg grating sensors. Em: EESMS 2014 - 2014 IEEE WORKSHOP ON ENVIRONMENTAL, ENERGY AND STRUCTURAL MONITORING SYSTEMS, PROCEEDINGS 2014, **Anais...** : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014.

CAPELAS, B. **A fibra óptica se esgotará em 10 anos**. 2020. Disponível em: <<https://link.estadao.com.br/noticias/geral,a-fibra-optica-se-esgotara-em-10-anos,10000032470>>. Acesso em: 24 maio. 2020.

CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P. Modeling of induced mechanical effects of alkali-aggregate reactions. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 251–260, 1998.

CARRIÓN, A.; GENOVÉS, V.; GOSÁLBEZ, J.; MIRALLES, R.; PAYÁ, J. Ultrasonic signal modality: A novel approach for concrete damage evaluation. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 101, p. 25–32, 2017. . Acesso em: 28 abr. 2019.

CARVALHO, M. C. **Redes de Bragg em fibras óticas poliméricas (FOP)**. 2010. Tese de doutorado - Instituto militar de engenharia, [s. l.], 2010.

CASTRO, N.; SORENSEN, B. E.; BROEKMANS, M. A. T. M. Quantitative assessment of alkali-reactive aggregate mineral content through XRD using polished sections as a supplementary tool to RILEM AAR-1 (petrographic method). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 11, p. 1428–1437, 2012.

CASTRO-CAICEDO, A.; TOORES, P.; LAIN, R. Packaging and testing of fiber Bragg gratings for use as strain sensor in rock specimens. **8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications**, [s. l.], v. 8785, n. 1, p. 7, 2013. . Acesso em: 19 abr. 2019.

CHANG, P. C.; FLATAU, A.; LIU, S. C. Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure. **Structural Health Monitoring: An International Journal**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 257–267, 2003. . Acesso em: 7 out. 2018.

CHATTERJI, S. Chemistry of alkali–silica reaction and testing of aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 27, n. 7–8, p. 788–795, 2005.

CHEN, J.; JAYAPALAN, A. R.; KIM, J.; KURTIS, K. E.; JACOBS, L. J. Rapid evaluation of alkali–silica reactivity of aggregates using a nonlinear resonance spectroscopy technique.

Cement and Concrete Research, [s. l.], v. 40, n. 6, p. 914–923, 2010. . Acesso em: 28 abr. 2019.

CHEN, W.; DONG, X. Modification of the wavelength-strain coefficient of FBG for the prediction of steel bar corrosion embedded in concrete. **Optical Fiber Technology**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 47–50, 2012. . Acesso em: 11 dez. 2018.

CHESTER, A. N.; MARTELLUCCI, S.; SCHEGGI, A. M. V. **Optical fiber sensors**. 1. ed. California: Springer, 1987.

CHILDS, P.; WONG, A. C. L.; TERRY, W.; PENG, G. D. Measurement of crack formation in concrete using embedded optical fibre sensors and differential strain analysis. **Measurement Science and Technology**, [s. l.], v. 19, n. 6, p. 065301, 2008.

COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A. **Relatório Técnico-Científico ITC04 Amortecimento: classificação e métodos de determinação**, ATCP, 2010.

COSTA, U.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E. Minimizing alkali leaching in the concrete prism expansion test at 38 °C. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 146, p. 547–554, 2017.

COUTO, D.; HELENE, P.; ALMEIDA, L. C. Temperature monitoring in large volume spread footing foundations: case study “Parque da Cidade” - São Paulo. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 953–968, 2016.

CRED. **International Disaster Database**, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2020. Disponível em: <<https://public.emdat.be/>>

CSA. **A23.1 - Concrete Materials And Methods Of Concrete Construction/Test Methods And Standard Practices For Concrete**, Canadian Standards Association, 2014. a.

CSA. **A23.2-25A-14 - Test Method for Detection of Alkali-Silica Reactive Aggregate by Accelerated Expansion of Mortar Bars**, Canadian Standards Association, 2014. b.

CSA. **A23.2-14A-14 - Potential Expansivity of Aggregates; Procedure for Length Change Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Prisms**, Canadian Standards Association, 2014. c.

DAHLEN, U.; RYDEN, N.; JAKOBSSON, A. Damage identification in concrete using impact non-linear reverberation spectroscopy. **NDT & E International**, [s. l.], v. 75, p. 15–25, 2015. . Acesso em: 28 abr. 2019.

DÄHN, R.; ARAKCHEEVA, A.; SCHAUB, Ph.; PATTISON, P.; CHAPUIS, G.; GROLIMUND, D.; WIELAND, E.; LEEMANN, A. Application of micro X-ray diffraction to

investigate the reaction products formed by the alkali–silica reaction in concrete structures. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 79, p. 49–56, 2016.

DAMINELI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Influence of packing and dispersion of particles on the cement content of concretes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 10, n. 5, p. 998–1024, 2017. . Acesso em: 11 maio. 2020.

DAUD, S.; ALI, J. **Fibre Bragg Grating and No-Core Fibre Sensors**. 1. ed. Switzerland: Springer, 2018.

DE ALMEIDA, W. F.; MATINC, C.; MENDES, A. B.; KONRAD, O. Efeitos do uso de frequência de ultrassom na dispersão de sedimentos agregados. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 97–111, 2017. Disponível em: <<http://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/SPC2179-6858.2017.003.0010>>

DE SOUZA, D. J.; SANCHEZ, L. F. M. Understanding the efficiency of autogenous and autonomous self-healing of conventional concrete mixtures through mechanical and microscopical analysis. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 172, p. 107219, 2023. a.

DE SOUZA, D. J.; SANCHEZ, L. F. M. Understanding the efficiency of autogenous and autonomous self-healing of conventional concrete mixtures through mechanical and microscopical analysis. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 172, p. 107219, 2023. b.

DIAB, S. H.; SOLIMAN, A. M.; NOKKEN, M. R. Effect of triggering material, size, and casting direction on ASR expansion of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 269, p. 121323, 2021.

DIAMOND, S. Effects of Microsilica (Silica Fume) on Pore-Solution Chemistry of Cement Pastes. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 66, n. 5, p. C-82- C–84, 1983.

DIÓGENES, H. J. F.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C. Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response. **RIEM - IBRACON Structures and Materials Journal**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 11, 2011. . Acesso em: 14 out. 2018.

DJAYAPRABHA, H. S.; CHANG, T.; SHIH, J. Comparison Study of Dynamic Elastic Moduli of Cement Mortar and No-cement Slag Based Cementitious Mortar Activated with Calcined Dolomite with Impulse Excitation Technique. **MATEC Web of Conferences**, [s. l.], v. 186, p. 02004, 2018.

DU, Y.; SUN, B.; LI, J.; ZHANG, W. **Optical Fiber Sensing and Structural Health Monitoring Technology**. 1. ed. Singapore: Springer Singapore, 2019.

DUNANT, C. F.; SCRIVENER, K. L. Effects of uniaxial stress on alkali-silica reaction induced expansion of concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 567–576, 2012.

FAJKUS, M.; NEDOMA, J.; MEC, P.; PINKA, M.; NOVAK, M.; ZABKA, S. Deformation sensor composed of fiber Bragg grating and the strain gauge for use in civil engineering. Em: (G. Kamerman, O. Steinvall, Eds.)**ELECTRO-OPTICAL REMOTE SENSING XII 2018**, Berlin, Germany. **Anais...** Berlin, Germany: SPIE, 2018.

FAN, L.; BAO, Y.; MENG, W.; CHEN, G. In-situ monitoring of corrosion-induced expansion and mass loss of steel bar in steel fiber reinforced concrete using a distributed fiber optic sensor. **Composites Part B: Engineering**, [s. l.], v. 165, p. 679–689, 2019.

FARNAM, Y.; GEIKER, M. R.; BENTZ, D.; WEISS, J. Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damaged concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 60, p. 135–145, 2015. . Acesso em: 28 abr. 2019.

FEININGER, T. Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms. **The Canadian Mineralogist**, [s. l.], v. 45, n. 6, p. 1545–1546, 2007.

FERNANDES, D. **Medição simultânea do índice de refração e da temperatura utilizando redes de Bragg em fibras multimodo**. 2017. Dissertação de mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2017.

FERNANDES, I.; RIBEIRO, M. A.; BROEKMANS, M. A. T. M.; SIMS, S. **Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis**. [s.l: s.n.]. v. 1. Acesso em: 28 maio. 2023.

FIDANBOYLU, K.; EFENDIOGLU, H. S. Fiber optic sensors and their applications. Em: **5TH INTERNATIONAL ADVANCED TECHNOLOGIES SYMPOSIUM 2009**, Karabuk, Turkey. **Anais...** Karabuk, Turkey: Karabuk University, 2009.

FIGUEIRA, R. B.; SOUSA, R.; COELHO, L.; AZENHA, M.; DE ALMEIDA, J. M.; JORGE, P. A. S.; SILVA, C. J. R. Alkali-silica reaction in concrete: Mechanisms, mitigation and test methods. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 222, p. 903–931, 2019.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 167–191, 2000.

FRARE, A.; APARECIDA LANGARO, E.; DE SOUZA, D. J.; FARIAS DE MEDEIROS, M. H. Revisão sistemática sobre reação álcali-agregado: panorama comparativo dos estudos realizados no Canadá e no Brasil. **Revista ALCONPAT**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 1–27, 2022.

FROTTÉ, C.; DI NUBILA, C. S. A.; NAGALLI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; DE OLIVEIRA, L. O. S. Study of physical and mechanical concrete properties with partial replacement of natural aggregate by recycled aggregate from CDW. **Revista Materia**, [s. l.], v. 22, n. 2, 2017.

FUHR, P. L.; SPAMMER, S. J. Fiber optic sensors in the Waterbury Bridge. Em: (C. C. Jung, E. Udd, Eds.)PROCEEDINGS OF SPIE 1998, Troutdale, United States. **Anais...** Troutdale, United States: International Society for Optics and Photonics, 1998.

GALLYAMOV, E. R.; LEEMANN, A.; LOTHENBACH, B.; MOLINARI, J.-F. Predicting damage in aggregates due to the volume increase of the alkali-silica reaction products. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 154, p. 106744, 2022.

GAO, J.; WU, J.; LI, J.; ZHAO, X. Monitoring of corrosion in reinforced concrete structure using Bragg grating sensing. **NDT & E International**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 202–205, 2011. . Acesso em: 11 set. 2018.

GAO, X. X.; MULTON, S.; CYR, M.; SELLIER, A. Alkali–silica reaction (ASR) expansion: Pessimum effect versus scale effect. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 44, p. 25–33, 2013.

GARCIA, D. C. S.; SOARES, M. M. N. S.; BEZERRA, A. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; FIGUEIREDO, R. B. Microstructure and hardness of cement pastes with mineral admixture. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 22, n. 2, 2017.

GHOLIZADEH VAYGHAN, A.; RAJABIPOUR, F.; ROSENBERGER, J. L. Composition–rheology relationships in alkali–silica reaction gels and the impact on the gel's deleterious behavior. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 83, p. 45–56, 2016.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A.; RAJABIPOUR, F. The influence of alkali–silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 94, p. 49–58, 2017. a.

GHOLIZADEH-VAYGHAN, A.; RAJABIPOUR, F. The influence of alkali–silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 94, p. 49–58, 2017. b.

GIANNINI, E. R.; SANCHEZ, L. F. M.; TUINUKUAFE, A.; FOLLIARD, K. J. Characterization of concrete affected by delayed ettringite formation using the stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 162, p. 253–264, 2018.

GIDRÃO, G. M. S. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2015.

GLISIC, B.; INAUDI, D. **Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring**. Newport Beach: John Wiley & Sons, 2007. . Acesso em: 7 out. 2018.

GOBBI, A.; MEDEIROS, M. H. F. DE; CAVALARO, S. H. P.; PIERALISI, R. Protocolo de atuação para barragens de concreto com presença de reação sulfática interna. [s. l.], p. 1832–1843, 2020. . Acesso em: 28 maio. 2023.

GOMES, S. L.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. Silica and its Peculiarities. **Revista Virtual de Química**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 1018–1038, 2018.

GOUVEIA, C. A. J.; BATISTA, J. M.; JORGE, A. S. P. Refractometric Optical Fiber Platforms for Label Free Sensing. Em: **Current Developments in Optical Fiber Technology**. 1. ed. IntechOpen: InTech, 2013. p. 30.

GRATTAN, S. K. T.; TAYLOR, S. E.; SUN, T.; BASHEER, P. A. M.; GRATTAN, K. T. V. Monitoring of Corrosion in Structural Reinforcing Bars: Performance Comparison Using In Situ Fiber-Optic and Electric Wire Strain Gauge Systems. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 9, n. 11, p. 1494–1502, 2009.

GRATTAN, K. T. V.; MEGGITT, B. T. . **Optical Fiber Sensor Technology: Devices and Technology**. 1. ed. London, UK: Springer US, 1998.

GRATTAN, K. T. V.; MEGGITT, B. T. . **Optical Fiber Sensor Technology: Applications and Systems**. 1. ed. Netherlands: Springer US, 1999.

GRATTAN, K. T. V.; MEGGITT, B. T. . **Optical Fiber Sensor Technology**. 1. ed. New York: Springer, 2000.

GRATTAN-BELLEW, P. E.; DANAY, A. Comparison of Laboratory and Field Evaluation of AAR in Large Dams. Em: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE AAR IN HYDROELECTRIC PLANTS AND DAMS 1992, New Brunswick, Canada. **Anais...** New Brunswick, Canada: Canadian Electrical Association in association with Canadian National Committee of the International Commission on Large Dams, 1992.

GUO, J. S.; WALDRON, P. Development of the stiffness damage test (SDT) for characterisation of thermally loaded concrete. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 483–491, 2000. . Acesso em: 29 abr. 2019.

GUTHRIE, G. D.; CAREY, J. W. A simple environmentally friendly, and chemically specific method for the identification and evaluation of the alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 27, n. 9, p. 1407–1417, 1997.

HABEL, W. R.; KREBBER, K.; DAUM, W. Standardization in fiber-optic sensing for structural safety: activities in the ISHMII and IEC. Em: (K. J. Peters, Ed.)**SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING 2015**, San Diego, California, United States. **Anais...** San Diego, California, United States: SPIE, 2015.

HAN, J.; PAN, G.; SUN, W. Elastic modulus change investigation of cement paste before and after carbonation using nanoindentation technique. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 27, p. 341–347, 2012.

HAN, S.; KIM, J. Effect of temperature and age on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 7, p. 1219–1227, 2004.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado no concreto. Em: **Concreto: ciência e tecnologia**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. a. v. 2p. 1067–1166.

HASPARYK, N. P. Reação Álcali-Agregado no Concreto. Em: BERNARDO TUTIKIAN; FERNANDA PACHECO; GERALDO ISAÍÁ; INÊS BATTAGIN (Eds.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. b. v. 2p. 0–2055.

HASPARYK, N. P.; SANCHEZ, L. F. M. S. **Instrução Técnica DSBE001 - SDT - Método de Ensaio para a Determinação do Índice de Dano de Rigidez (SDI) e Índice de Deformação Plástica (PDI) em Concretos**. Goiânia.

HASSAN, M.; BAKAR, M.; DAMBUL, K.; ADIKAN, F.; HASSAN, M. R. A.; BAKAR, M. H. A.; DAMBUL, K.; ADIKAN, F. R. M. Optical-Based Sensors for Monitoring Corrosion of Reinforcement Rebar via an Etched Cladding Bragg Grating. **Sensors**, [s. l.], v. 12, n. 11, p. 15820–15826, 2012. . Acesso em: 11 dez. 2018.

HBM. **FBG encapsuladas**. 2020. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/>>. Acesso em: 3 jul. 2020.

HELMUTH, R.; STARK, D.; DIAMOND, S.; MORANVILLE-REGOURD, M. **Alkali-silica reactivity: an overview of research**. Washington.

HEWLETT, P.; LISKA, M. **Lea's Chemistry of Cement and Concrete**. 5. ed. [s.l.] : Elsevier, 2019.

HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, [s. l.], v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978. . Acesso em: 10 set. 2018.

HONG, W.; WU, Z. S.; YANG, C. Q.; WAN, C. F.; WU, G.; ZHANG, Y. F. Condition assessment of reinforced concrete beams using dynamic data measured with distributed long-gage macro-strain sensors. **Journal of Sound and Vibration**, [s. l.], v. 331, n. 12, p. 2764–2782, 2012.

HOPPE FILHO, J. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. 2008. Tese de doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2008.

HOU, X.; STRUBLE, L. J.; KIRKPATRICK, R. J. Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 9, p. 1683–1696, 2004.

HU, W.; CAI, H.; YANG, M.; TONG, X.; ZHOU, C.; CHEN, W. Fe–C-coated fibre Bragg grating sensor for steel corrosion monitoring. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 53, n. 5, p. 1933–1938, 2011. . Acesso em: 11 set. 2018.

IAEA. **Guidebook on non-destructive testing of concrete structures** International Atomic Energy Agency. Viena.

ICHIKAWA, T. Alkali–silica reaction, pessimum effects and pozzolanic effect. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 8, p. 716–726, 2009.

IEA. **Cement**. Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/cement>>. Acesso em: 5 abr. 2023.

IEC. **IEC 61757:2018 - Fibre optic sensors - Generic specification**, 2018.

IMARC. **Optical Sensor Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2023-2028**. New York. Disponível em: <<https://www.imarcgroup.com/optical-sensor-market>>. Acesso em: 5 abr. 2023.

ISLAM, M. R.; BAGHERIFAEZ, M.; ALI, M. M.; CHAI, H. K.; LIM, K.; AHMAD, H. Tilted Fiber Bragg Grating Sensors for Reinforcement Corrosion Measurement in Marine Concrete Structure. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. l.], v. 64, n. 12, p. 3510–3516, 2015.

ISLAM, M. S.; GHAFUORI, N. A new approach to evaluate alkali-silica reactivity using loss in concrete stiffness. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 167, p. 578–586, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818302800>>. Acesso em: 28 abr. 2019.

ISMAIL, N.; HAFIZI, Z. M.; OOI, C.-W.; BIN ZAINI, M. K. A.; NIZWAN, C. K. E.; LIM, K.-S.; AHMAD, H. Fiber Bragg Grating-Based Fabry-Perot Interferometer Sensor for Damage Detection on Thin Aluminum Plate. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 3564–3571, 2020.

JAREK, A.; ROCHA, R. P. O.; LACERDA, L. A.; MEDEIROS, B. L. Uso da Tecnologia DTSS para Monitoramento de Deformações em Concreto sujeito à Reação Álcali-Agregado. Em: 45 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 2012, Maceio. **Anais...** Maceio: IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, 2012.

JĘDRZEJEWSKA-SZCZERSKA, M. Response of a New Low-Coherence Fabry-Perot Sensor to Hematocrit Levels in Human Blood. **Sensors**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 6965–6976, 2014.

JIN, J.; MORENO, M. G.; RIVIERE, J.; SHOKOUHI, P. Impact-Based Nonlinear Acoustic Testing for Characterizing Distributed Damage in Concrete. **Journal of Nondestructive Evaluation**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 51, 2017.

JOHANSSON, S.; SJÖDAHL, P.; MONDANOS, S. M.; STORK, A. Distributed fibre optic sensing in Swedish dams and tailing storage facilities. **Hydropower & Dams**, [s. l.], n. 2, 2023.

JOHN, V.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção. Em: IV SEMINÁRIO - RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo

KAKLAUSKAS, G.; SOKOLOV, A.; RAMANAUSKAS, R.; JAKUBOVSKIS, R. Reinforcement Strains in Reinforced Concrete Tensile Members Recorded by Strain Gauges and FBG Sensors: Experimental and Numerical Analysis. **Sensors**, [s. l.], v. 19, n. 1, 2019.

KARAIKOS, G.; DERAEMAERKER, A.; AGGELIS, D. G.; HEMELRIJCK, D. V. Monitoring of concrete structures using the ultrasonic pulse velocity method. **Smart Materials and Structures**, [s. l.], v. 24, n. 11, p. 113001, 2015.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg gratings**. 2. ed. Oxford, UK: Academic Press, 2010.

KAWABATA, Y.; YAMADA, K. The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali–silica reaction at the pessimum proportion. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 92, p. 1–15, 2017.

KAWAMURA, M.; FUWA, H. Effects of lithium salts on ASR gel composition and expansion of mortars. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 913–919, 2003.

KHADOUR, A.; WAEYTENS, J. Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors. **Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures**, [s. l.], p. 97–121, 2018. . Acesso em: 11 dez. 2018.

KHAN, M. A. **Bridge and highway structure rehabilitation and repair**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2010. . Acesso em: 9 set. 2018.

KIM, T.; OLEK, J. Chemical Sequence and Kinetics of Alkali-Silica Reaction Part I. Experiments. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 97, n. 7, p. 2204–2212, 2014.

KIM, T.; OLEK, J.; JEONG, H. Alkali–silica reaction: Kinetics of chemistry of pore solution and calcium hydroxide content in cementitious system. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 71, p. 36–45, 2015.

KISTER, G.; WINTER, D.; GEBREMICHAEL, Y. M.; LEIGHTON, J.; BADCOCK, R. A.; TESTER, P. D.; KRISHNAMURTHY, S.; BOYLE, W. J. O.; GRATTAN, K. T. V.; FERNANDO, G. F. Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 29, n. 9, p. 2048–2055, 2007.

KLEINA, M. S. M.; BRAGANÇA, M. D. G. P.; PORTELLA, K. F.; RIBEIRO, B. E.; ALBERTI, E. Monitoramento de reação álcali-agregado em barras de concreto instrumentadas por sensores de bragg em diferentes condições de exposição. **Bruno Endo Ribeiro**, [s. l.], v. Ed. Especi, p. 17, 2017.

KO, J. M.; NI, Y. Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 27, n. 12, p. 1715–1725, 2005. . Acesso em: 9 out. 2018.

KOCAB, D.; KUCHARCZYKOVA, B.; MISAK, P.; ZITT, P.; KRALIKOVA, M. Development of the Elastic Modulus of Concrete under Different Curing Conditions. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 195, p. 96–101, 2017.

KUHNE, J. F. **Redes de Bragg em fibras óticas multimodo: análise numérica e experimental da sensibilidade ao índice de refração**. 2016. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2016.

KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; BROWN, J. T.; MEYER-ILSE, W. Imaging of ASR Gel by Soft X-Ray Microscopy. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 411–421, 1998.

LANGARO, E. A. **Estudo de diagnóstico e inibição da reação álcali-sílica utilizando cinza volante e proteção de superfície com silicatos**. 2023. Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2023.

LARIVE, C.; LAPLAUD, A.; COUSSY, O. The role of water in alkali-silica reaction. Em: PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AAR 2000, Québec City. **Anais...** Québec City

LAU, K. T.; YUAN, L.; ZHOU, L. M.; WU, J.; WOO, C. H. Strain monitoring in FRP laminates and concrete beams using FBG sensors. **Composite Structures**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 9–20, 2001.

LEE, B. J.; KEE, S.; OH, T.; KIM, Y. Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete Using Shear-Wave Velocity Measurements. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 2017, p. 1–13, 2017.

LEE, J. R.; TSUDA, H.; TOYAMA, N. Impact wave and damage detections using a strain-free fiber Bragg grating ultrasonic receiver. **NDT and E International**, [s. l.], v. 40, n. 1, p. 85–93, 2007.

LEEMANN, A.; GORA, M.; LOTHENBACH, B.; HEUBERGER, M. P. Alkali Silica Reaction in Concrete - Revealing the Expansion Mechanism by Surface Force Measurements. **SSRN**, [s. l.], 2023.

LEEMANN, A.; KATAYAMA, T.; FERNANDES, I.; BROEKMANS, M. A. T. M. Types of alkali–aggregate reactions and the products formed. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, [s. l.], v. 169, n. 3, p. 128–135, 2016.

LEEMANN, A.; LE SAOUT, G.; WINNEFELD, F.; RENTSCH, D.; LOTHENBACH, B. Alkali-Silica Reaction: the Influence of Calcium on Silica Dissolution and the Formation of Reaction Products. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 94, n. 4, p. 1243–1249, 2011.

LEEMANN, A.; SHI, Z.; LINDGÅRD, J. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 137, p. 106190, 2020. a.

LEEMANN, A.; SHI, Z.; LINDGÅRD, J. Characterization of amorphous and crystalline ASR products formed in concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 137, p. 106190, 2020. b.

LENG, J. S.; ASUNDI, A. NDE of smart structures using multimode fiber optic vibration sensor. **NDT and E International**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 45–51, 2002.

LEUNG, C. K. Y. Fiber optic sensors in concrete: the future? **NDT & E International**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 85–94, 2001. . Acesso em: 11 dez. 2018.

LEUNG, C. K. Y.; WAN, K. T.; INAUDI, D.; BAO, X.; HABEL, W.; ZHOU, Z.; OU, J.; GHANDEHARI, M.; WU, H. C.; IMAI, M. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 871–906, 2015. . Acesso em: 29 abr. 2020.

LI, C.; SUN, H.; LI, L. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010.

LI, G. W.; HONG, C. Y.; DAI, J.; YU, L.; ZHOU, W. H. FBG-Based Creep Analysis of GFRP Materials Embedded in Concrete. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], v. 2013, p. 1–9, 2013. . Acesso em: 28 abr. 2019.

LI, H.; LI, D.; SONG, G. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 26, n. 11, p. 1647–1657, 2004. . Acesso em: 11 set. 2018.

LI, J.; ZHOU, Z.; OU, J. Interface transferring mechanism and error modification of embedded FBG strain sensor. Em: (E. Udd, D. Inaudi, Eds.)SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2004: SMART SENSOR TECHNOLOGY AND MEASUREMENT SYSTEMS 2004, **Anais...** : SPIE, 2004. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.540813>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

LI, R.; TAN, Y.; CHEN, Y.; HONG, L.; ZHOU, Z. Investigation of sensitivity enhancing and temperature compensation for fiber Bragg grating (FBG)-based strain sensor. **Optical Fiber Technology**, [s. l.], v. 48, p. 199–206, 2019. . Acesso em: 13 mar. 2019.

LI, S.; WU, Z. Sensitivity Enhancement of Long-gage FBG Sensors for Macro-strain Measurements. **Structural Health Monitoring: An International Journal**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 415–423, 2009.

LI, W.; KAWASHIMA, S.; XIAO, J.; CORR, D. J.; SHI, C.; SHAH, S. P. Comparative investigation on nanomechanical properties of hardened cement paste. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 1591–1604, 2016.

LIANG, M.; CHEN, N.; FANG, X.; WU, G. Strain transferring mechanism analysis of the surface-bonded FBG sensor. **Applied Optics**, [s. l.], v. 57, n. 20, p. 5837, 2018.

LIFSET, R.; ECKELMAN, M. Material efficiency in a multi-material world. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [s. l.], v. 371, n. 1986, p. 20120002, 2013.

LINDGÅRD, J.; THOMAS, M. D. A.; SELLEVOLD, E. J.; PEDERSEN, B.; ANDIÇ-ÇAKIR, Ö.; JUSTNES, H.; RØNNING, T. F. Alkali–silica reaction (ASR)—performance testing: Influence of specimen pre-treatment, exposure conditions and prism size on alkali leaching and prism expansion. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 53, p. 68–90, 2013.

LIU, B. D.; LV, W. J.; LI, L.; LI, P. F. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 69, p. 133–142, 2014.

LO, Y.; XIAO, F. Measurement of Corrosion and Temperature Using a Single-Pitch Bragg Grating Fiber Sensor. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 800–807, 1998. . Acesso em: 11 dez. 2018.

LOKAJICEK, T.; PRIKRYL, R.; SACHLOVA, S.; KUCHAROVA, A. Acoustic emission monitoring of crack formation during alkali silica reactivity accelerated mortar bar test. **Engineering Geology**, [s. l.], v. 220, p. 175–182, 2017. . Acesso em: 28 abr. 2019.

LOURENÇO, L. C.; ALVES, V. R.; JORDY, J. C.; MENDES, L. C.; LOURENÇO, M. V. C. Parâmetros de Avaliação de Patologias em Obras-de-Arte Especiais. **Engenharia Civil**, [s. l.], v. 34, p. 5–14, 2009. . Acesso em: 7 out. 2018.

MAASKANT, R.; ALAVIE, T.; MEASURES, R. M.; TADROS, G.; RIZKALLA, S. H.; GUHA-THAKURTA, A. Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 21–33, 1997. . Acesso em: 11 dez. 2018.

MACIOSKI, G.; MARTINS, L. A.; MUELLER, T.; MATOSKI, A. Avaliação das propriedades de argamassas com adição de fibra de Curauá (*Ananas Erectifolius*). **Revista Engenharia e Construção Civil**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 52–62, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/recc/article/view/6649>>

MACIOSKI, G.; SANCHEZ, L. F. M.; BAO, X.; MEDEIROS, M. H. F. Monitoring alkali-aggregate reaction (AAR) induced expansion through the use of fiber Bragg grating sensors.

Em: 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI AGGREGATE REACTION IN CONCRETE – ICAAR 2021, Lisboa. **Anais...** Lisboa

MAIA NETO, F. M.; ANDRADE, T. W. C. O.; GOMES, R. M.; LEAL, A. F.; ALMEIDA, A. N. F.; LIMA FILHO, M. R. F.; TORRES, S. M. Considerations on the effect of temperature, cation type and molarity on silica degradation and implications to ASR assessment. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 299, p. 123848, 2021.

MAJUMDER, M.; GANGOPADHYAY, T. K.; CHAKRABORTY, A. K.; DASGUPTA, K.; BHATTACHARYA, D. K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s. l.], v. 147, n. 1, p. 150–164, 2008. . Acesso em: 10 set. 2018.

MAO, J.; CHEN, J.; CUI, L.; JIN, W.; XU, C.; HE, Y. Monitoring the corrosion process of reinforced concrete using BOTDA and FBG sensors. **Sensors (Basel, Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 8866–83, 2015. . Acesso em: 6 mar. 2019.

MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 225, p. 941–955, 2019.

MEC, P.; STOLARIK, M.; ZABKA, S.; NOVAK, M. Application of FBG in the experimental measurements of structural elements deformation from cement composites. Em: (G. Kamerman, O. Steinvall, Eds.)ELECTRO-OPTICAL REMOTE SENSING XII 2018, Berlin, Germany. **Anais...** Berlin, Germany: SPIE, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete - Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. Berkeley: McGraw-Hill Education, 2013. . Acesso em: 9 set. 2018.

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 29–41, 2002.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

MIRANDA, D. C.; BRONHOLO, J. L.; BRAGANÇA, M. O. G. P.; PORTELLA, K. F.; FIGUEIRA, I. F. R.; MEDEIROS, B. L.; HASPARYK, N.; KUPERMAN, S. C. Avaliação do potencial de reatividade álcali-agregado de areias naturais do estado do Paraná. Em: 40 SIMPÓSIO PARANAENSE DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES 2019, Curitiba. **Anais...** Curitiba

MIRANDA, L. F. R.; ANGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 57–71, 2009.

MITSCHKE, F. **Fiber Optics: Physics and Technology**. 2. ed. Berlim: Springer, 2016.

MOBLEY, R. K. **An Introduction to Predictive Maintenance**. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2002. . Acesso em: 9 set. 2018.

MOHAMMED, T. U.; HAMADA, H.; YAMAJI, T. Alkali-Silica Reaction-Induced Strains over Concrete Surface and Steel Bars in Concrete. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 100, n. 2, 2003.

MONTEIRO, P. J. M.; HELENE, P. R. L.; KANG, S. H. Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 443–452, 1993. . Acesso em: 29 abr. 2020.

MONTIJA, F. C. **Aspectos da variabilidade experimental do ensaio de módulo de deformação do concreto**. 2007. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MOSER, E. M. **Medidas múltiplas de características de barrengns de concreto compactado com rolo utilizando instrumentação por fibra ótica**. 2006. Dissertação - Univesidade Federal do Paraná, [s. l.], 2006.

MOUSAVI, E.; CHESHOMI, A.; ASHTARI, M. Estimating elasticity modulus and uniaxial compressive strength of sandstone using indentation test. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [s. l.], v. 169, p. 157–166, 2018.

MULTON, S.; BARIN, F.-X.; GODART, B.; TOUTLEMONDE, F. Estimation of the Residual Expansion of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 54–62, 2008.

MULTON, S.; SELLIER, A.; CYR, M. Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 490–500, 2009.

MUNHOZ, G. S.; DOBROVOLSKI, M. E. G.; PEREIRA, E.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Effect of improved autogenous mortar self-healing in the alkali-aggregate reaction. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 117, p. 103905, 2021.

NACARATTI, D. P.; SAMAD, R. E.; MOTTA, C. C. Modeling of Fiber Bragg Gratings with Different Lengths for the Reflectivity Control for Fiber Lasers. Em: 2021 SBFOTON

INTERNATIONAL OPTICS AND PHOTONICS CONFERENCE (SBFOTON IOPC) 2021, **Anais...** : IEEE, 2021.

NADEEM, A.; MEMON, S. A.; LO, T. Y. Evaluation of fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures through stiffness damage test. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 38, p. 1058–1065, 2013. . Acesso em: 29 abr. 2019.

NASH, W. A.; POTTER, M. C. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. New York: Bookman Editora, 2014.

NATESAIYER, K. Some applications of the gel fluorescence test for alkali-aggregate reaction in concrete. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 15, n. 1–2, p. 3–6, 1993.

NETO, C. B. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. Em: **Concreto: Ciência e tecnologia**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1p. 285–316.

NETO, C. B.; QUITETE, E. B.; BATTAGIN, A. F. **Prática recomendada IBRACON: Guia de prevenção da reação álcali-agregado**. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2018. v. 1

NOËL, M.; SANCHEZ, L.; TAWIL, D. Structural implications of internal swelling reactions in concrete: review and research needs. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 70, n. 20, p. 1052–1063, 2018.

OECD. **OECD Economic Surveys: Brazil 2018**, OECD, 2018.

OKAMOTO, K. **Fundamentals of optical waveguides**. 2. ed. Ibaraki, Japan: Elsevier, 2006.

OLIVEIRA, V. **Redes de Bragg para medições em altas temperaturas**. 2012. Tese de doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2012.

OTHONOS, A. Fiber Bragg gratings. **Review of Scientific Instruments**, [s. l.], v. 68, n. 12, p. 4309, 1998.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg gratings - Fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. 1. ed. Norwood: Artech House Print on Demand, 1999.

PAIVA, R. C. **Produção e caracterização de redes de Bragg gravadas em fibra multimodo e aplicadas ao setor de biocombustíveis**. 2015. Dissertação de mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2015.

PAULON, V. A. Reação álcali-agregado: Saiba como prevenir e avaliar, modelar e reparar estruturas de concreto afetadas. **Concreto & Construções**, São Paulo, p. 100, 2016.

PEDROSO, F. L. Pesquisador brasileiro desenvolve métodos de ensaio promissores para diagnóstico de reações expansivas no concreto. **CONCRETO & Construções**, [s. l.], v. XLVIII, n. 99, p. 30–31, 2020.

PENA, M. R. G. **Estudo da Fissuração Associada à Retração em Argamassas para Reparo em Estruturas de Concreto**. 2004. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2004.

PENNER, E. **Avaliação de desempenho de sistemas estruturais de pontes de concreto**. 2001. Tese de doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2001.

PEREIRA, D. A.; FRAZAO, O.; SANTOS, J. L. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature. **Optical Engineering**, [s. l.], v. 43, n. 2, p. 299, 2004. . Acesso em: 11 set. 2018.

PEREIRA, E.; PEREIRA, E.; PIANARO, S. A.; FARIAS, M. M.; BRAGANÇA, M. D. G. P.; OLIVEIRA, I. C. Combined effect of alkali-aggregate reaction (AAR) and internal sulfate attack (ISA): Microstructural and porous structure modifications of portland cement mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 362, p. 129676, 2023.

PETERS, K. J.; INAUDI, D. Fiber optic sensors for assessing and monitoring civil infrastructures. Em: **Sensor Technologies for Civil Infrastructures**. [s.l.] : Elsevier, 2014. p. 121–158.

PLUSQUELLEC, G.; GEIKER, M. R.; LINDGÅRD, J.; DUCHESNE, J.; FOURNIER, B.; DE WEERDT, K. Determination of the pH and the free alkali metal content in the pore solution of concrete: Review and experimental comparison. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 96, p. 13–26, 2017.

PORTELLA, K. F.; LAGOEIRO, L. E.; BRONHOLO, J. L.; MIRANDA, D. de C.; BRAGANÇA, M. D. G. P.; DIAS, B. G.; HASPARYK, N. P.; KUPERMAN, S. C. Alkali-silica reaction (ASR) - Investigation of crystallographic parameters of natural sands by backscattered electron diffraction. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2021.

POSSETTI, G. R. C.; KAMIKAWACHI, R. C.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. Metrological evaluation of optical fiber grating-based sensors: An approach towards the standardization. **Journal of Lightwave Technology**, [s. l.], v. 30, n. 8, p. 1042–1052, 2012.

PU, Q.; JIANG, L.; XU, J.; CHU, H.; XU, Y.; ZHANG, Y. Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 519–524, 2012.

QUINTELA, A.; JAUREGUI, C.; ECHEVARRA, J.; LOPEZ-HIGUERA, J. M. Embedded temperature strain fibre Bragg grating sensor system validation for concrete structures. **Journal**

of Optics A: Pure and Applied Optics, [s. l.], v. 4, n. 6, p. S387–S390, 2002. . Acesso em: 28 abr. 2019.

RAJABIPOUR, F.; GIANNINI, E.; DUNANT, C.; IDEKER, J. H.; THOMAS, M. D. A. Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 76, p. 130–146, 2015. a.

RAJABIPOUR, F.; GIANNINI, E.; DUNANT, C.; IDEKER, J. H.; THOMAS, M. D. A. Alkali–silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 76, p. 130–146, 2015. b.

RAJAN, G.; PRUSTY, B. G. **Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods**. 1. ed. Australia: CRC Press, 2016.

RAMACHANDRAN, V. S.; PAROLI, R. M.; BEAUDOIN, J. J.; DELGADO, A. H. **Handbook of thermal analysis of construction materials**. 1^a ed. Noyes publications. New York.

RAO, Y.-J.; RAN, Z.-L.; GONG, Y. **Fiber-Optic Fabry-Perot Sensors: An introduction**. 1. ed. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. v. 1

REAIEZH, A. Z. **Evaluating ASR Physicochemical Process Under Distinct Restraint Conditions for a Better Assessment of Affected Concrete Infrastructure**. 2022. Tese de doutorado - University of Ottawa, Ottawa, 2022.

REINHARDT, H. W.; MIELICH, O. A fracture mechanics approach to the crack formation in alkali-sensitive grains. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 3, p. 255–262, 2011.

REIS, J. M. L.; NUNES, L. C. S.; TRIQUES, A. L. C.; VALENTE, L. C. G.; BRAGAA, A. M. B. Mechanical characterization using optical fiber sensors of polyester polymer concrete made with recycled aggregates. **Materials Research**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 269–271, 2009.

RILEM. CPC 11.3 Absorption of water by concrete by immersion under vacuum. **Recommendation for the Testing and Use of Constructions Materials**, [s. l.], p. 36–37, 1994.

RILEM. **Guide to Diagnosis and Appraisal of AAR Damage to Concrete in Structures**. 1. ed. London: Springer, 2013.

RILEM. **Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures**. 1. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2016. v. 17

RIVARD, P.; BALLIVY, G. Assessment of the expansion related to alkali-silica reaction by the Damage Rating Index method. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 83–90, 2005. . Acesso em: 28 abr. 2019.

RIVARD, P.; BÉRUBÉ, M.; OLLIVIER, J.; BALLIVY, G. Alkali mass balance during the accelerated concrete prism test for alkali–aggregate reactivity. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 33, n. 8, p. 1147–1153, 2003.

RIVARD, P.; FOURNIER, B.; BALLIVY, G. The Damage Rating Index Method for ASR Affected Concrete—A Critical Review of Petrographic Features of Deterioration and Evaluation Criteria. **Cement, Concrete and Aggregates**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 11228, 2002. . Acesso em: 29 abr. 2019.

ROARK, R. J.; YOUNG, W.; BUDYNAS, R. **Roark’s Formulas for Stress and Strain**. 7. ed. Michigan: Mcgraw-hill, 2002.

ROCHA, R. P. O. **Instrumentação geotécnica com fibra ótica: monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos**. 2011. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, [s. l.], 2011.

RODRIGUES, C.; FÉLIX, C.; LAGE, A.; FIGUEIRAS, J. Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 1993–2002, 2010.

ŠACHLOVÁ, Š. Microstructure parameters affecting alkali–silica reactivity of aggregates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 49, p. 604–610, 2013.

ŠACHLOVÁ, Š.; PŘIKRYL, R.; PERTOLD, Z. Alkali-silica reaction products: Comparison between samples from concrete structures and laboratory test specimens. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 61, n. 12, p. 1379–1393, 2010.

SANCHEZ, L. **Contribution to the assessment of damage in aging concrete infrastructures affected by alkali-aggregate**. 2014. Tese de doutorado - Université Laval, Québec, Canada, 2014.

SANCHEZ, L. F. M.; DRIMALAS, T.; FOURNIER, B. Assessing condition of concrete affected by internal swelling reactions (ISR) through the Damage Rating Index (DRI). **Cement**, [s. l.], v. 1–2, p. 100001, 2020.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. Evaluation of the stiffness damage test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to ASR: Test loading and output responses for concretes incorporating fine or coarse reactive aggregates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 56, p. 213–229, 2014. a. . Acesso em: 29 abr. 2019.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J. Evaluation of the Stiffness Damage Test (SDT) as a tool for assessing damage in concrete due to alkali-silica reaction (ASR): Input parameters and variability of the test responses. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 77, p. 20–32, 2015. a.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Practical use of the Stiffness Damage Test (SDT) for assessing damage in concrete infrastructure affected by alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 125, p. 1178–1188, 2016. a. . Acesso em: 29 abr. 2019.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D.; SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BASTIEN, J.; MITCHELL, D. Tools for assessing damage in concrete affected by AAR coming from fine and coarse aggregates. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 84–91, 2017. a.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; DUCHESNE, J. Reliable quantification of AAR damage through assessment of the Damage Rating Index (DRI). **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 67, p. 74–92, 2015. b. . Acesso em: 29 abr. 2019.

SANCHEZ, L. F. M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MITCHELL, D.; BASTIEN, J. Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 93, p. 17–31, 2017. b.

SANCHEZ, L. F. M.; MULTON, S.; SELIER, A.; CYR, M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M. Comparative study of a chemo–mechanical modeling for alkali silica reaction (ASR) with experimental evidences. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 72, p. 301–315, 2014. b. . Acesso em: 28 abr. 2019.

SANCHEZ, L.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; BEDOYA, M. A. B.; BASTIEN, J.; DUCHESNE, J. Use of Damage Rating Index to Quantify Alkali-Silica Reaction Damage in Concrete: Fine versus Coarse Aggregate. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 113, n. 4, p. 395–407, 2016. b. . Acesso em: 29 abr. 2019.

SANTIAGO, W. C.; KROETZ, H. M.; BECK, A. T. Reliability-based calibration of Brazilian structural design codes used in the design of concrete structures. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 1288–1304, 2019.

SANTOS, A. Reação Álcali-Agregado: 60% das obras não previnem patologia. **Massa Cinzenta**, São Paulo, p. 1, 2019. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/reacao-alkali-agregado-60-das-obras-nao-previnem-patologia/>>

SAOUMA, V. E. **Diagnosis & Prognosis of AAR Affected Structures**. Cham: Springer International Publishing, 2021. v. 31. Acesso em: 28 maio. 2023.

SAOUMA, V. E.; ANDERSON, D. Z.; OSTRANDER, K.; LEE, B.; SLOWIK, V. Application of fiber Bragg grating in local and remote infrastructure health monitoring. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 259–266, 1998. . Acesso em: 29 abr. 2020.

SAOUMA, V.; PEROTTI, L. Constitutive model for alkali-aggregate reactions. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 103, n. 3, p. 194–202, 2006.

SILVA, C. S.; SANTOS, M.; MONTEIRO, E. C. B.; ANDRADE, T. W. C. O.; SOARES, W.; NEVES, D. Procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado. Investigação documental. **Revista ALCONPAT**, [s. l.], v. 11, n. 2, 2021.

SILVA, J. C. C. **Monitoração de vibrações de estruturas com o emprego de sensores em fibra óptica**. 2005. Tese de doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [s. l.], 2005.

SILVA, J. C. C.; MARTELLI, C.; KALINOWSKI, H. J.; PENNER, E.; CANNING, J.; GROOTHOFF, N. Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings. **Optics and Lasers in Engineering**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 88–92, 2007. . Acesso em: 2 abr. 2019.

SILVA, N. G.; CAMPITELI, C. C. Correlação entre módulo de elasticidade dinâmico e resistências mecânicas de argamassas de cimento, cal e areia. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 21–35, 2008.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e comportamento de fundações de barragens de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SILVEIRA, J. F. A. A importância dos extensômetros múltiplos na instrumentação de barragens afetadas pela RAA. Em: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALIAGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBRACON, 2006.

SIMS, I.; POOLE, A. B. **Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review**. 1. ed. London: Taylor & Francis, 2017.

SINNO, N.; SHEHATA, M. H. Effect of sample geometry and aggregate type on expansion due to alkali-silica reaction. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 209, p. 738–747, 2019.

SLOWIK, V.; SCHLATTNER, E.; KLINK, T. Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 473–479, 2004.

SMAOUI, N.; BÉRUBÉ, M.-A.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B. Influence of Specimen Geometry, Orientation of Casting Plane, and Mode of Concrete Consolidation on Expansion Due to ASR. **Cement, Concrete, and Aggregates**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 1–13, 2004.

SOUZA, D. J. **Avoiding & mitigating alkali-aggregate reaction (aar) in concrete structures**. 2022. Tese de doutorado - University of Ottawa, Ottawa, 2022.

SU, H.; LI, J.; HU, J.; WEN, Z. Analysis and Back-Analysis for Temperature Field of Concrete Arch Dam During Construction Period Based on Temperature Data Measured by DTS. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1403–1412, 2013.

SWAMY, N.; RIGBY, G. Dynamic properties of hardened paste, mortar and concrete. **Matériaux et Constructions**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 13–40, 1971.

SWAMY, R. N. **The Alkali-silica reaction in concrete**. 1. ed. New York: Taylor & Francis, 1992.

TAN, C. H.; ADIKAN, F. R. M.; SHEE, Y. G.; YAP, B. K. Non-destructive fiber Bragg grating based sensing system: Early corrosion detection for structural health monitoring. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s. l.], v. 268, p. 61–67, 2017. . Acesso em: 11 dez. 2018.

TAN, C. H. H.; SHEE, Y. G. G.; YAP, B. K. K.; ADIKAN, F. R. R. M. Fiber Bragg grating based sensing system: Early corrosion detection for structural health monitoring. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s. l.], v. 246, p. 123–128, 2016. . Acesso em: 11 dez. 2018.

THOMAS, M. D.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K. J.; IDEKER, J. H.; RESENDEZ, Y. **FHWA-HRT-06-133 - The use of lithium to prevent or mitigate alkali-silica reaction in concrete pavements and structures**. [s.l: s.n.].

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M. Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali–silica reaction in concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 36, n. 10, p. 1842–1856, 2006.

TIECHER, F. **Influência do grau de cristalinidade e deformação do quartzo no desencadeamento da reação álcali-agregado**. 2010. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

TORRES, B.; PAYÁ-ZAFORTEZA, I.; CALDERÓN, P. A.; ADAM, J. M. Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 539–548, 2011.

TROTTIER, C. **Evaluation of ASR-induced damage generation and prolongation in affected recycle concrete**. 2020. Tese de doutorado - University of Ottawa, Ottawa, 2020.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2020**. 1. ed. Virginia: USGS, 2020.

VALDUGA, L. **Reação alcali-agregado: mapeamento de agregados reativos do Estado de São Paulo**. 2002. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2002.

VENANCIO, P. G.; COTTIS, R. A.; NARAYANASWAMY, R.; FERNANDES, J. C. S. Optical sensors for corrosion detection in airframes. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [s. l.], v. 182, p. 774–781, 2013. . Acesso em: 11 dez. 2018.

VO, D.; MULTON, S.; MORENON, P.; SELLIER, A.; GRIMAL, E.; MASSON, B.; KOLMAYER, P. Evaluation of structures affected by Alkali-Silica reaction (ASR) using homogenized modelling of reinforced concrete. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 246, p. 112845, 2021.

VULLIEX, P. **Distributed fiber-optic sensing solves real-world problems**. 2013. Disponível em: <<https://www.laserfocusworld.com/articles/2013/01/fiber-optic-sensing-distributed-fiber-optic-sensing-solves-real-world-problems.html>>. Acesso em: 27 jan. 2019.

WALSH, J. The effects of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks. **Journal of Geophysical Research**, [s. l.], p. 339–411, 1962.

WANG, J.; HU, C.; XU, H.; KANG, J.; ZHANG, Z.; GONG, H. Application research of DTS system in dam. Em: (B. Culshaw, Y. Liao, A. Wang, X. Bao, X. Fan, L. Zhang, Eds.) 2010, **Anais...** [s.l: s.n.]

WANG, T. T.; ZUPKO, H. M. Long-term mechanical behaviour of optical fibres coated with a u.v.-curable epoxy acrylate. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 2241–2248, 1978.

WANG, Y.; TJIN, C. S.; HAO, J.; LIM, T.-K.; TAN, K.-B.; CHAN, K. M.; MOYO, P.; BROWNJOHN, J. M. W. Determination of load-strain characteristics of concrete slabs by using embedded fiber Bragg grating sensors. Em: (P. F. Gobin, C. M. Friend, Eds.) FIFTH EUROPEAN CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS 2000, Glasgow, United Kingdom. **Anais...** Glasgow, United Kingdom: International Society for Optics and Photonics, 2000.

WILLIAMSON, J.; ISGOR, O. B. The effect of simulated concrete pore solution composition and chlorides on the electronic properties of passive films on carbon steel rebar. **Corrosion Science**, [s. l.], v. 106, p. 82–95, 2016.

WILLNER, A. E. **Optical fiber telecommunications VII**. 7. ed. London: Elsevier, 2019.

WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Monte Carlo simulation of electron-solid interactions in cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 1076–1082, 2006.

XIONG, L.; JIANG, G.; GUO, Y.; KUANG, Y.; LIU, H. Investigation of the Temperature Compensation of FBGs Encapsulated With Different Methods and Subjected to Different Temperature Change Rates. **Journal of Lightwave Technology**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 917–926, 2019.

XU, H.; WANG, S.; MIAO, X. Research of three-dimensional force sensor based on multiplexed fiber Bragg grating strain sensors. **Optical Engineering**, [s. l.], v. 56, n. 4, p. 047103, 2017. . Acesso em: 9 out. 2018.

YAZDIZADEH, Z.; MARZOUK, H.; HADIANFARD, M. A. Monitoring of concrete shrinkage and creep using Fiber Bragg Grating sensors. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 137, p. 505–512, 2017. . Acesso em: 28 abr. 2019.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. **Fiber Optic Sensors**. 2. ed. New Hampshire: CRC Press, 2008.

YOU, R.; REN, L.; SONG, G. A Novel Fiber Bragg Grating (FBG) Soil Strain Sensor. **Measurement**, [s. l.], 2019. . Acesso em: 13 mar. 2019.

ZAMARREÑO, C. R.; RIVERO, P. J.; HERNAEZ, M.; GOICOECHEA, J.; MATÍAS, I. R.; ARREGUI, F. J. Optical Sensors for Corrosion Monitoring. **Intelligent Coatings for Corrosion Control**, [s. l.], p. 603–640, 2015. . Acesso em: 11 dez. 2018.

ZECH, B.; SETZER, M. J. The dynamic elastic modulus of hardened cement paste. Part I: A new statistical model-water and ice filled pores. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 21, n. 5, p. 323–328, 1988. . Acesso em: 29 abr. 2020.

ZECH, B.; SETZER, M. J. The dynamic modulus of hardened cement paste. Part 2: Ice formation, drying and pore size distribution. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 125–132, 1989. . Acesso em: 29 abr. 2020.

ZHENG, Z.; SUN, X.; LEI, Y. Monitoring corrosion of reinforcement in concrete structures via fiber Bragg grating sensors. **Frontiers of Mechanical Engineering in China**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 316–319, 2009. . Acesso em: 11 dez. 2018.

ZHOU, Y.; GAO, J.; SUN, Z.; QU, W. A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 98, p. 137–145, 2015.

ZHOU, Z.; LIU, W.; HUANG, Y.; WANG, H.; JIANPING, H.; HUANG, M.; JINPING, O. Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement. **Mechanical Systems and Signal Processing**, [s. l.], v. 28, p. 36–49, 2012.

ZOILLO, C. S. **Estudo de Deslocamentos na Tomada d'Água da UHE Jaguari Devidos à Reação Álcali-Agregado**. 2010. Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2010.

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Para a análise estatística dos dados, primeiramente foi realizado o teste de normalidade (Shapiro-Wilk, com significância de 0,05) com os dados bruto, com objetivo de garantir que os dados se comportam dentro de uma distribuição normal padrão. Posteriormente os dados passaram por análise de variância (ANOVA, com significância de 0,05) para verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Para se verificar quais dados apresentavam variação significativa, foi realizada a comparação múltipla de médias pelo teste de Tukey (com significância de 0,05), que consiste em comparar pares de médias e se baseia na diferença mínima significativa.

Deformação específica das argamassas

Tabela A.1 – ANOVA – Deformação específica das argamassas.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Carga	4	251360,38695	62840,09674	444,3123	<0.0001
Sensor	2	7615,26984	3807,63492	26,92197	<0.0001
Interação	8	5520,62317	690,0779	4,87921	<0.0001
Erro	120	16971,8724	141,43227		
Total	134	281468,15235			

Com 95% de probabilidade, o efeito da Carga é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Sensor é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.2 – TUKEY – Deformação específica das argamassas.

Carga	Sensor	Grupos		
49,05 N	Relógio	A		
49,05 N	FBG	B		
39,24 N	Relógio	B		
49,05 N	Straingauge	B		
39,24 N	FBG	C		
39,24 N	Straingauge	C		
29,43 N	Relógio	C	D	
29,43 N	FBG		D	E
29,43 N	Straingauge			E
19,62 N	Relógio			F
19,62 N	FBG			F
19,62 N	Straingauge			F
9,81 N	FBG			G
9,81 N	Straingauge			G
9,81 N	Relógio			G

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Módulo estático das argamassas

Tabela A.3 – ANOVA – Módulo estático das argamassas.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	132	3539,15602	26,81179		
Total	134	3994,41916			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.4 – TUKEY – Módulo estático das argamassas.

Método	Grupos
Extensômetro	A
FBG	A
Relógio	B

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Frequência natural de ressonância das argamassas

Tabela A.5 – ANOVA – Frequência natural de ressonância das argamassas.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	24	1200,5192	50,02163		
Total	27	9304,7817			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.6 – TUKEY – Frequência natural de ressonância das argamassas.

Método	Grupos
MEF	A
FBG	B
Extensômetro	B
Acelerômetro	C

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Amortecimento das argamassas

Tabela A.7 – ANOVA – Amortecimento das argamassas.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	32	0,00187	5,86E-05		
Total	35	0,00241			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.8 – TUKEY – Amortecimento das argamassas.

Método	Grupos
Acelerômetro	A
FBG	A
Extensômetro	A
Microfone	A

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Módulo dinâmico das argamassas

Tabela A.9 – ANOVA – Módulo dinâmico das argamassas.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	49	79,42791	1,62098		
Total	54	731,59518			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.10 – TUKEY – Módulo dinâmico das argamassas.

Método	Grupos
MEF	A
Ultrassom	B
Microfone	C
FBG	C D
Extensômetro	D
Acelerômetro	E

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Expansão do concreto - pinos

Tabela A.11 – ANOVA – Expansão do concreto – pinos.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Geometria	1	6,77E-06	6,77E-06	81,08488	<0.0001
Idade	12	3,81E-06	3,17E-07	3,79632	<0.0001
Interação	12	5,69E-07	4,74E-08	0,56778	0,86461
Erro	130	1,09E-05	8,35E-08		
Total	155	2,36E-05			

Com 95% de probabilidade, o efeito da Geometria é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.12 – TUKEY – Expansão do concreto – pinos.

Geometria	Idade	Grupos						
Cilindro	365	A						
Cilindro	334	A	B					
Cilindro	306	A	B	C				
Cilindro	275	A	B	C	D			
Cilindro	188	A	B	C	D	E		
Cilindro	257	A	B	C	D	E	F	
Cilindro	217	A	B	C	D	E	F	
Cilindro	161	A	B	C	D	E	F	
Cilindro	125	A	B	C	D	E	F	G
Cilindro	84	A	B	C	D	E	F	G
Cilindro	56	A	B	C	D	E	F	G
Prisma	365	A	B	C	D	E	F	G
Prisma	334	A	B	C	D	E	F	G
Prisma	217		B	C	D	E	F	G
Prisma	306			C	D	E	F	G
Prisma	275			C	D	E	F	G
Cilindro	26				D	E	F	G
Prisma	188			C	D	E	F	G
Prisma	257			C	D	E	F	G
Cilindro	7					E	F	G
Prisma	161			C	D	E	F	G
Prisma	84				D	E	F	G
Prisma	125					E	F	G
Prisma	56					E	F	G
Prisma	26						F	G
Prisma	7							G

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Porosidade do concreto

Tabela A.13 – ANOVA – Porosidade do concreto.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	7	1,09E-05	1,56E-06		
Total	13	0,00262			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.14 – TUKEY – Porosidade do concreto.

Idade	Grupos		
360 dias	A		
270 dias	A	B	
7 dias	A	B	C
168 dias		B	C
28 dias			C
56 dias			D
84 dias			D

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Resistencia à compressão do concreto

Tabela A.15 – ANOVA – Resistência à compressão do concreto.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	7	39,59223	5,65603		
Total	13	170,39976			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações não são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.16 – TUKEY – Resistência à compressão do concreto.

Idade	Grupos
56 dias	A
84 dias	A
168 dias	A
360 dias	A
28 dias	A
270 dias	A
7 dias	A

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Módulo elástico do concreto

Tabela A.17 – ANOVA – Módulo elástico do concreto.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Erro	1	0,30768	0,30768		
Total	7	77,89867			

Com 95% de probabilidade, as médias das populações não são significativamente diferentes.

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.18 – TUKEY – Módulo elástico do concreto.

Idade	Grupos
84 dias	A
56 dias	B
28 dias	C
360 dias	D

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

Expansão do concreto - FBG

Tabela A.19 – ANOVA – Expansão do concreto – FBG.

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	F tabelado
Idade	10	9,23226	0,92323	3,89742	<0.0001
Local	3	85,49449	28,49816	120,30556	<0.0001
Interação	30	5,75087	0,1917	0,80925	0,75355
Erro	342	81,01348	0,23688		
Total	385	195,4497			

Com 95% de probabilidade, o efeito da Idade é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito da Local é significativo

Com 95% de probabilidade, o efeito de Interação não é significativo

GDL: Graus de liberdade;

SQ: Soma de quadrados;

MQ: Médias quadradas;

Teste F: Distribuição F de Snedecor;

F tabelado: Valor para 95% de confiança das variabilidades serem diferentes do ruído.

Tabela A.20 – TUKEY – Expansão do concreto – FBG.

Idade	Sensor	Grupos								
26 dias	Temperatura	A								
7 dias	Temperatura	A	B							
56 dias	Temperatura	A	B							
84 dias	Temperatura	A	B							
161 dias	Temperatura	A	B							
125 dias	Temperatura	A	B							
306 dias	Temperatura	A	B	C	D	E	F	G		
217 dias	Temperatura	A	B	C	D					
356 dias	Temperatura	A	B	C	D	E	F	G		
251 dias	Temperatura	A	B	C	D	E	F	G		
188 dias	Temperatura	A	B	C	D					
26 dias	Brita	A	B	C						
7 dias	Brita	A	B							
217 dias	Brita	A	B	C	D	E				
188 dias	Brita	A	B	C	D	E				
251 dias	Brita	A	B	C	D	E				
56 dias	Brita	A	B	C	D	E				
84 dias	Brita	A	B	C	D	E				
306 dias	Brita	A	B	C	D	E	F			
161 dias	Brita	A	B	C	D	E				
125 dias	Brita	A	B	C	D	E				
356 dias	Brita	A	B	C	D	E	F	G	H	I
7 dias	Argamassa	A	B	C	D	E	F	G	H	I
7 dias	Superfície	A	B	C	D	E	F	G	H	
26 dias	Argamassa	A	B	C	D	E	F	G	H	I
26 dias	Superfície		B	C	D	E	F	G	H	I
356 dias	Argamassa	A	B	C	D	E	F	G	H	I
306 dias	Argamassa	A	B	C	D	E	F	G	H	I
56 dias	Argamassa			C	D	E	F	G	H	I
84 dias	Argamassa				D	E	F	G	H	I
56 dias	Superfície						F	G	H	I
161 dias	Argamassa				D	E	F	G	H	I
125 dias	Argamassa				D	E	F	G	H	I
84 dias	Superfície							G	H	I
188 dias	Superfície								H	I
125 dias	Superfície									I
161 dias	Superfície									I
356 dias	Superfície									I
217 dias	Superfície									I
251 dias	Superfície									I
306 dias	Superfície									I
251 dias	Argamassa				D	E	F	G	H	I
188 dias	Argamassa			C	D	E	F	G	H	I
217 dias	Argamassa					E	F	G	H	I

Dados que não compartilham a mesma letra são significativamente diferentes.

APÊNDICE B – DESCRIÇÕES PETROGRÁFICAS



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização:	São José dos Pinhais - PR
Amostra:	R1
Rocha:	Gnaisse
ANÁLISE MACROSCÓPICA	
Rocha de cor cinza claro a médio, granulação fina à média, estrutura gnáissica, textura granoblástica a porfiroblástica, com alternância de bandas milimétricas constituídas por quartzo e feldspato alcalino e bandas compostas por minerais máficos. Porfiroblastos são compostos majoritariamente por quartzo.	
ANÁLISE MICROSCÓPICA	
MINERAL (%modal) ^(*)	DESCRIÇÃO
Feldspato alcalino (40)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos, dimensões superiores aos dos demais minerais da rocha, por vezes sob forma de porfiroblastos. Apresentam-se intensamente sericitizados, com fraturas preenchidas por carbonato, intercrescimento pertítico com padrão textural em chamas, bem como intercrescimento gráfico frequentes.
Quartzo (25)	Ocorre em cristais xenoblásticos, com granulação fina à média, com contatos suturados entre si e com os demais minerais da rocha, extinção ondulante acentuada, sendo mais intensa nos cristais mais grossos. Presença de subgrãos e lamelas de deformação desenvolvidas localmente. Localizadamente, ocorre no preenchimento de fraturas, em associação a carbonatos.
Biotita + Clorita (20)	Biotita ocorre em cristais verdes, total ou parcialmente cloritizados, dispostos intersticialmente à associação mineral essencial. Associa-se, igualmente, a minerais opacos (representados por fases ricas em Ti, sobretudo rutilo e leucoxênio, além de magnetita e piritita), epidoto e titanita, como subprodutos de alteração hidrotermal. Fraturas preenchidas por filossilicatos (sericita + clorita) e carbonato são comuns ao longo de toda a amostra analisada. Clorita é observada em cristais xenoblásticos verdes, dispostos intersticialmente ao longo de toda a amostra; associa-se a opacos e, mais raramente, a epidoto, sendo toda essa associação mineral oriunda da desestabilização da biotita primária ou, ainda, da hornblenda.
Plagioclásio (10)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos, com composição variando de albita a oligoclásio, com geminação polissintética bem desenvolvida, por vezes com lamelas deformadas; sericitização varia de incipiente a moderada sobretudo ao longo dos planos de geminação; fraturas preenchidas por carbonato são comuns e intercrescimento mirmequítico é raramente observado.
Carbonato (5)	Ocorre em preenchimento de fraturas e associado a alteração de plagioclásio, sendo que nota-se substituição parcial em alguns cristais.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Hornblenda/Apatita/ Zircão/Opacos/ Allanita/Titanita/ Epidoto (<5)	Titanita, totalmente leucoxenizada, ocorre inclusa em quartzo e feldspato alcalino; os demais encontram-se inclusos nos minerais essenciais da rocha, estando, individualmente, presentes em porcentagens modais inferiores a 5%.
ESTRUTURA	
Cataclástica	
TEXTURA	
Granoblástica	
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	
GNAISSE	

(*) Porcentagens modais estimadas visualmente.

RESULTADO:

REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIALMENTE REATIVA

OBS: Tanto a descrição macroscópica quanto a descrição microscópica correspondem apenas à amostra enviada para análise, representando uma descrição local e pontual da rocha.

Curitiba, 22 de junho de 2023

Profª. Drª. Cristina Valle Pinto-Coelho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização:	São José dos Pinhais - PR
Amostra:	R2
Rocha:	Gnaisse
ANÁLISE MACROSCÓPICA	
Rocha de cor rosa acinzentado, granulação média à grossa, estrutura gnáissica, textura granoblástica à porfiroblástica, com bandas constituídas por minerais félsicos (majoritariamente feldspato alcalino), por vezes com espessuras centimétricas. Fraturas ortogonais a subortogonais ao bandamento são frequentes.	
ANÁLISE MICROSCÓPICA	
MINERAL (%modal) ^(*)	DESCRIÇÃO
Plagioclásio (30)	Cristais subdioblásticos a xenoblásticos, com composição variando de albita a oligoclásio, geminação polissintética bem desenvolvida, por vezes com lamelas deformadas; sericitização intensa, atingindo por vezes todo o cristal; fraturas preenchidas por carbonato são comuns e intercrescimento mirmequítico é raramente observado.
Quartzo (25)	Ocorre em cristais xenoblásticos, com granulação predominantemente média, contatos suturados entre si e com os demais minerais da rocha, extinção ondulante acentuada, sendo mais intensa nos cristais mais grossos. Presença de subgrãos e lamelas de deformação desenvolvidas localmente; os cristais encontram-se em grande maioria intensamente fraturados. Localizadamente, ocorre no preenchimento de fraturas, em associação a carbonatos.
Feldapato alcalino (20)	Cristais xenoblásticos, intensamente sericitizados, fraturas preenchidas por carbonato, intercrescimento perítico pouco desenvolvido, com padrão textural em gotas pouco evidenciado, além de filete e em chamas.
Clorita + Biotita (10)	Ocorrem em cristais verdes, subdioblásticos, por vezes orientados, sugerindo bandamento gnáissico pouco pronunciado, em cristais com granulação fina à média. Determinadas porções da rocha mostram clorita em pseudomorfose total sobre biotita.
Carbonato (10)	Ocorre em cristais com granulação variando de fina à média, límpidos, associados tanto ao preenchimento de fraturas quanto intersticiais.
Opacos (5)	Cristais predominantemente xenoblásticos, identificados em luz refletida como rutilo e pirita, oriundos da desestabilização de biotita.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Titanita/Apatita/ Hornblenda/Allanita (<5)	Titanita ocorre total ou parcialmente leucoxenizada, sendo raros os cristais não alterados.
ESTRUTURA	
Cataclástica	
TEXTURA	
Granoblástica	
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	
GNAISSE	

(*) Percentagens modais estimadas visualmente.

RESULTADO:

REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIALMENTE REATIVA

OBS: Tanto a descrição macroscópica quanto a descrição microscópica correspondem apenas à amostra enviada para análise, representando uma descrição local e pontual da rocha.

Curitiba, 21 de junho de 2023

Prof^a. Dr^a. Cristina Valle Pinto-Coelho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização:	São José dos Pinhais - PR
Amostra:	R3A
Rocha:	Granitoide
ANÁLISE MACROSCÓPICA	
<p>Rocha de cor rosa, granulação fina à média, textura granoblástica, estrutura cataclástica, constituída predominantemente por feldspato alcalino e quartzo, minerais máficos ocorrem em porcentagens modais pouco significativas. Fraturas preenchidas por material rosa (feldspato alcalino) ocorrem em múltiplas direções seccionando a orientação preferencial.</p>	
ANÁLISE MICROSCÓPICA	
MINERAL (%modal) ^(*)	DESCRIÇÃO
Feldspato alcalino (35)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos, por vezes sob forma de porfiroblastos; apresentam turbidez intensa. Encontram-se intensamente sericitizados, com fraturas preenchidas por carbonato, intercrescimento perfitico com padrão textural em chamas é observado raramente.
Quartzo (25)	Ocorre em cristais xenoblásticos, com granulação fina à média, contatos suturados entre si e com os demais minerais da rocha, extinção ondulante acentuada. Presença de subgrãos e lamelas de deformação desenvolvidas localmente. Localizadamente, ocorre no preenchimento de fraturas, em associação a carbonatos. Pontualmente são encontrados em porções milonitizadas, com grãos fortemente cominuídos.
Biotita + Clorita (25)	Biotita ocorre em cristais verdes, total ou parcialmente cloritizados, dispostos intersticialmente à associação mineral essencial. Associa-se, igualmente, a minerais opacos (fases minerais ricas em Ti, rutilo, magnetita e pirita), epidoto e titanita, como subprodutos de alteração hidrotermal. Fraturas ortogonais a subortogonais preenchidas por filossilicatos (sericita + clorita), quartzo e carbonato seccionam toda a amostra analisada. Não foram observados cristais de biotita não alterados. Clorita é observada em cristais xenoblásticos verdes orientados, dispostos intersticialmente ao longo de toda a amostra; associa-se a opacos e, mais raramente, a epidoto, sendo toda essa associação mineral oriunda da desestabilização da biotita primária.
Plagioclásio (5)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos, com composição variando de albita a oligoclásio, geminação polissintética bem desenvolvida, turbidez acentuada, por vezes com lamelas deformadas; sericitização varia de incipiente a moderada sobretudo ao longo dos planos de geminação; fraturas preenchidas por carbonato são comuns.
Carbonato (10)	Presente em cristais bem desenvolvidos, límpidos, seja no preenchimento de fraturas, seja intersticial à assembleia mineral essencial.
Opacos/Titanita/ Zircão (<5)	Opacos primários são raros, predominando aqueles associados à alteração de biotita; titanita encontra-se total ou parcialmente leucoxenizada e zircão metamictizado.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

ESTRUTURA
Cataclástica a milonítica
TEXTURA
Granoblástica
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA
GNAISSE

(*) Porcentagens modais estimadas visualmente.

RESULTADO:

REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIALMENTE REATIVA

OBS: Tanto a descrição macroscópica quanto a descrição microscópica correspondem apenas à amostra enviada para análise, representando uma descrição local e pontual da rocha.

Curitiba, 21 de junho de 2023

Prof^a. Dr^a. Cristina Valle Pinto-Coelho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização:	São José dos Pinhais - PR
Amostra:	R3B
Rocha:	Granitoide
ANÁLISE MACROSCÓPICA	
<p>Rocha de cor rosa a rosa acinzentado, granulação média, textura granoblástica, estrutura maciça a localmente gnáissica, constituída por feldspato alcalino, quartzo e minerais máficos. São comuns fraturas milimétricas a centimétricas preenchidas por feldspato alcalino e quartzo, além de fraturas milimétricas com preenchimento por material castanho.</p>	
ANÁLISE MICROSCÓPICA	
MINERAL (% modal) ^(*)	DESCRIÇÃO
Feldspato alcalino (30)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos, granulação fina à média, turbidez intensa. Fraturas preenchidas por carbonato; intercrescimento pertítico com padrão textural em chamas, bem como intercrescimento gráfico são raramente observados. Porfiroblastos ocorrem esporadicamente.
Quartzo (25)	Ocorre em cristais xenoblásticos, com granulação fina à média, contatos suturados entre si e com os demais minerais da rocha, extinção ondulante acentuada, sendo mais intensa nos cristais mais grossos. Presença de subgrãos e lamelas de deformação desenvolvidas localmente. Localizadamente, ocorre no preenchimento de fraturas, em associação a carbonatos. São frequentes na rocha fraturas preenchidas por quartzo fortemente cominuído, em associação com material castanho + carbonato + clorita.
Biotita + Clorita (15)	Biotita ocorre em cristais verdes, total ou parcialmente cloritizados, dispostos intersticialmente à associação mineral essencial. Associa-se, igualmente, a minerais opacos (magnetita, pirita e fases minerais ricas em Ti), epidoto e titanita, como subprodutos de alteração hidrotermal. Fraturas preenchidas por filosilicatos (sericita + clorita) e carbonato são comuns ao longo de toda a amostra analisada. Clorita é observada em cristais xenoblásticos verdes, dispostos intersticialmente ao longo de toda a amostra; associa-se aos opacos mencionados acima e, mais raramente, a epidoto, sendo toda essa associação mineral oriunda da desestabilização da biotita primária.
Plagioclásio (10)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos de oligoclásio, com geminação polissintética bem desenvolvida, por vezes com lamelas deformadas; sericitização varia de incipiente a moderada sobretudo ao longo dos planos de geminação; fraturas preenchidas por carbonato são comuns.
Opacos (10)	Cristais subidioblásticos a xenoblásticos, predominantemente secundários, originários da desestabilização de biotita, tendo sido identificados em luz refletida como magnetita, ilmenita, pirita e fases minerais de Ti. Opacos primários são raramente observados.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Carbonato (10)	Cristais xenoblásticos, límpidos, dispostos ao longo de fraturas que seccionam toda a amostra, bem como dispõem-se intersticialmente e associados à alteração de plagioclásio e biotita.
Apatita/zircão/ titanita/allanita (<5)	Titanita ocorre total ou parcialmente leucoxenizada, em associação à clorita em pseudomorfos de biotita. Os demais minerais encontram-se inclusos na associação mineral essencial da rocha.
ESTRUTURA	
Cataclástica a milonítica	
TEXTURA	
Granoblástica	
CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA	
GNAISSE	

(*) Percentagens modais estimadas visualmente.

RESULTADO:

REATIVIDADE POTENCIAL ÁLCALI-AGREGADO: POTENCIALMENTE REATIVA

OBS: Tanto a descrição macroscópica quanto a descrição microscópica correspondem apenas à amostra enviada para análise, representando uma descrição local e pontual da rocha.

Curitiba, 21 de junho de 2023

Profª. Drª. Cristina Valle Pinto-Coelho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

FICHA DE DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA	
Localização:	São José dos Pinhais - PR
Amostra:	R3C
Rocha:	Gnaisse
ANÁLISE MACROSCÓPICA	
Rocha rosa-acinzentada, granulação fina à média, textura granoblástica, estrutura gnáissica incipiente, constituída predominantemente por feldspato alcalino, quartzo e minerais máficos em porcentagens modais pouco significativas. Fraturas preenchidas por material rosa (feldspato alcalino) ocorrem em múltiplas direções seccionando o bandamento gnáissico.	
ANÁLISE MICROSCÓPICA	
MINERAL (% modal) ^(*)	DESCRIÇÃO
Quartzo (45)	Ocorre em cristais subidioblásticos a xenoblásticos, com intensa extinção ondulante, recristalizados e com formação de subgrãos, estando presentes tanto sob a forma de porfiroblastos quanto em geração matricial, essa última em granulação fina à média.
Plagioclásio (20)	Constituído por cristais cujas composições variam de albíta a oligoclásio, ocorrendo em duas gerações de cristalização: porfiroblastos, em cristais com granulação média, sericitização intensa e lamelas de geminação localmente deformadas; a segunda geração constitui cristais matriciais, com granulação fina, turbidez incipiente e lamelas de geminação bem desenvolvidas.
Feldspato alcalino (15)	Predomina na amostra em cristais subidioblásticos intensamente sericitizados, presentes majoritariamente na matriz, sendo raros os porfiroblastos; pertita com padrão textural em chama e em filetes ocorre subsidiariamente. São comuns fraturas preenchidas por carbonatos e filossilicatos.
Hornblenda (5)	Ocorre em cristais subidioblásticos verdes, totalmente alterados para assembleia mineral constituída por clorita+biotita+carbonatos+opacos + titanita.
Clorita + biotita (5)	Presentes na rocha como subprodutos da estabilização de hornblenda, sendo raros os cristais subidioblásticos de biotita pouco alterados.
Titanita (5)	Ocorre em cristais subidioblásticos a idioblásticos, sobretudo como produto de alteração de hornblenda, titanita primária é observada raramente.
Opacos/Zircão/ Apatita/Allanita/ Carbonato (5)	Opacos foram identificados ao microscópio em luz refletida como magnetita (com exsoluções de ilmenita) e pirita, sendo sobretudo secundários; carbonato ocorre como alteração de hornblenda e, ainda, associado a preenchimento de fraturas que seccionam a assembleia mineral essencial; os demais minerais, presentes em porcentagens modais inferiores a 5%, são observados inclusos em feldspatos (alcalino e plagioclásio) e quartzo.
ESTRUTURA	
Cataclástica	
TEXTURA	
Porfiroblástica	



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

CLASSIFICAÇÃO DA ROCHA
METARRIOLITO

(*) Porcentagens modais estimadas visualmente.

OBS: Tanto a descrição macroscópica quanto a descrição microscópica correspondem apenas à amostra enviada para a análise, representando uma descrição local e pontual da rocha.

Curitiba, 21 de junho de 2023

Prof^a. Dr^a. Cristina Valle Pinto-Coelho