

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA - SP**

FLAVIO HIOCHIO SATO

**MONITORAMENTO DE UMIDADE EM CONCRETO DE BARRAGEM DE USINA
HIDROELÉTRICA PARA ESTUDO DE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO E
UTILIZAÇÃO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS**

Ilha Solteira

2017

FLAVIO HIOCHIO SATO

**MONITORAMENTO DE UMIDADE EM CONCRETO DE BARRAGEM
DE USINA HIDROELÉTRICA PARA ESTUDO DE REAÇÃO ÁLCALI-
AGREGADO E UTILIZAÇÃO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS
DIGITAIS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aparecido Augusto de Carvalho
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S253m Sato, Flávio Hiochio.
Monitoramento de umidade em concreto de barragem de usina hidroelétrica para estudo de reação álcali-agregado e utilização de correlação de imagens digitais / Flávio Hiochio Sato. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
116 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017

Orientador: Aparecido Augusto de Carvalho

Co-orientador: Jefferson Sidney Camacho

Inclui bibliografia

1. Automação. 2. Correlação digital de imagens. 3. Reação álcali-agregado.



Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção

Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação

Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

CRB/8 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Monitoramento de umidade em concreto de barragem de usina hidroelétrica para estudo de reação álcali-agregado e utilização de correlação de imagens digitais.

AUTOR: FLAVIO HIOCHIO SATO

ORIENTADOR: APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO

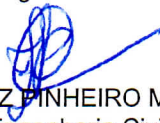
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:



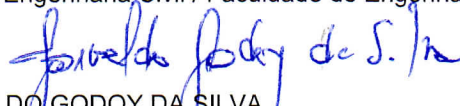
Prof. Dr. APARECIDO AUGUSTO DE CARVALHO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MARCELO AUGUSTO ASSUNÇÃO SANCHES
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSE LUIZ PINHEIRO MELGES
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOSIVALDO GODOY DA SILVA
Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Geografia - UFMSP



Prof. Dr. ALEXSANDRO DOS SANTOS FELIPE
Engenharia Civil / Instituto Federal de Goiano - Campus de Rio Verde

Ilha Solteira, 08 de dezembro de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pelas bênçãos que sempre derramou sobre mim.

A minha esposa Elen, amor da minha vida, minha companheira para todos os momentos.

Às minhas filhas, Sofia e Pérola, alegrias da minha vida.

Aos meus pais, Mário e Maria, e aos meus irmãos, Sonia e Sérgio, por serem a base sólida que sempre me fortaleceu.

AGRADECIMENTOS

Ao senhor Deus, sempre em primeiro lugar, por estar comigo todo o tempo, iluminando o meu caminho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho, pela oportunidade que me deu de conhecer um novo mundo na Engenharia Elétrica, pela paciência e pelo exemplo de dedicação ao ensino e aos alunos.

A minha esposa, Elen, pelo incentivo sempre presente.

Ao corpo técnico e docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UNESP de Ilha Solteira, pelo suporte técnico e infraestrutura.

Ao prof. Jefferson Sidney Camacho pelo apoio e ajudas em várias etapas do trabalho.

Aos meus familiares e amigos pelo apoio e motivação sempre constantes e pela compreensão nos muitos momentos de inevitável ausência.

RESUMO

O desenvolvimento de sistemas capazes de monitorar e controlar informações estão sendo cada vez mais utilizados, permitindo maior refinamento e confiança nos resultados. Na área instrumental de laboratório, existem situações que exigem maior controle sobre o ensaio. Com o atual avanço na área de microprocessadores, microcontroladores, sensores inteligentes, entre outros, têm impulsionado a utilização dos mesmos na melhoria e confiabilidade de processos mecânicos, químicos, físicos, biológicos, de inteligência artificial, de melhoria de qualidade de vida de pessoas com deficiência. Os processos podem ser melhorados utilizando equipamentos que possuem sistemas embarcados capazes de processar informações e fazer o controle a partir de sistemas operacionais que antes só eram possíveis nos computadores. Na área das grandes estruturas de concreto não é diferente, deve-se monitorar algumas variáveis que resultam em uma manifestação patológica conhecida como reação álcali-agregado, que é um fenômeno de expansão que afeta a durabilidade e a resistência mecânica do concreto, este fenômeno está ligado à algumas variáveis, a umidade relativa interna é umas delas. Existem várias pesquisas no sentido de inibir as reações álcali-agregados, e é sabido que um importante passo antes do acontecimento da reação álcali-agregado em obras hidráulicas, como as usinas hidroelétricas é o monitoramento da umidade e da temperatura no interior do concreto e, acompanhamento das fissuras inerentes do processo de expansão. O presente trabalho implementou um sistema de monitoramento de baixo custo, de temperatura e umidade para estruturas de concreto de barragens hidroelétricas, demonstrando a desnecessidade de monitoramento da umidade relativa por esta já estar a 100% no interior do concreto, paralelamente, desenvolveu-se um sistema de automação em usinas hidroelétricas para o controle dos deslocamentos desta reação, foi feito o levantamento das técnicas de correlação de imagens digitais (CID) e constatou-se que é promissor desde que o processamento dos programas de refinamento das imagens acompanhe a tecnologia de câmeras com alta resolução.

Palavras-chave: Automação. Correlação digital de imagens. Reação álcali-agregado.

ABSTRACT

The development of systems able to monitor and control information is increasingly being used, allowing greater refinement and confidence in results. In the instrumental area of the laboratory, there are situations that require greater control over the test. With the current progress in the area of microprocessors, microcontrollers, intelligent sensors, among others, have encouraged the use of these in the improvement and reliability of mechanical, chemical, physical, biological, artificial intelligence, improving the quality of life of people with deficiency. Processes can be improved by using equipment that has embedded systems that can process information and control from operating systems that were previously only possible on computers. In the area of large concrete structures is not different, it is necessary to monitor some variables that result in a pathological manifestation known as alkali-aggregate reaction, which is an expansion phenomenon that affects the durability and the mechanical resistance of the concrete, this phenomenon is connected to some variables, the relative humidity is one of them. There are several researches to inhibit alkali-aggregate reactions and is known that an important step before the occurrence of the alkali-aggregate reaction in hydraulic works such as hydroelectric plants is the monitoring of humidity and temperature inside the concrete and, the inherent fissures of the expansion process. The present work implemented a low cost, temperature and humidity monitoring system for concrete structures of hydroelectric dams, demonstrating the lack of relative humidity monitoring because it is already 100% inside the concrete, in parallel, a system of automation in hydroelectric power plants to control the displacements of this reaction, a survey of digital image correlation techniques (DIC) was made and it has been contacted since the processing of image refinement programs accompanies the technology of cameras with high resolution.

Keywords: Digital image correlation. Automation. Alkali–aggregate reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura comprometida pela RAA.....	19
Figura 2 - Fissuras nos vertedouros da barragem e fissuras aleatórias no topo do contraforte.....	20
Figura 3 – (A) Fissuração tipo mapa em parede de eclusa, (B) Fissuração devido à expansão da RAA no concreto restringida pelo perfil metálico em tomada d’água. .	21
Figura 4 - Principais fatores que influenciam a reação álcali-sílica.	25
Figura 5 - Umidade relativa versus profundidade de concreto para pavimento em vários climas.....	27
Figura 6 - Sistema de controle a malha aberta (sem retroação).	28
Figura 7 - Sistema de controle a malha fechada (com retroação).....	28
Figura 8 - O procedimento do projeto de sistemas de controle.....	33
Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema de controle padrão.	34
Figura 10 - Processos para o projeto de um sistema de controle digital.	35
Figura 11 - Controle digital diagramado em blocos.	36
Figura 12 - Diagrama de blocos de uma cadeia de processamento utilizando o Arduino.....	39
Figura 13 - Hardware Arduino Uno.....	40
Figura 14 – Versões da placa de prototipagem Arduino.	41
Figura 15 – Relação do tamanho do pixel com o tamanho de amostra do objeto.....	43
Figura 16 – (a) Efeitos “barril” e (b) “almofada” das lentes.....	44
Figura 17 - Efeito de distorção tangencial de uma lente.	44
Figura 18 - Imagem original (A) com distorções e imagem distorcida (B).	45
Figura 19 – Padrão de mancha, (A) Padrão de mancha natural sobre a superfície de concreto, (B) Mancha pintada na superfície do aço.	46
Figura 20 – Grade em uma imagem de referência.....	48
Figura 21 – Esquema do sistema 3D-CID.....	53
Figura 22 - Correlação do deslocamento de pixels por CID.....	54
Figura 23 - Esquema de um subconjunto de 9 × 9 pixels.....	55
Figura 24 – Padrão DSCM em corpo de prova 1.	66
Figura 25 – Padrão DSCM em corpo de prova 2.	66
Figura 26 – Padrão DSCM em corpo de prova 3.	67
Figura 27 - Subconjunto do vetor de deslocamento para o método CID.....	67
Figura 28 - Fluxograma da correlação e rastreamento de imagens digitais.....	68
Figura 29 – Diagrama esquemático do retângulo.....	70
Figura 30 - Fluxograma do método ImageJ™.....	71
Figura 31 - Limite da foto por ImageJ™.....	72
Figura 32 - Diagrama de fluxo do método de ajuste gaussiano.	75
Figura 33 - Esquema da montagem gaussiana para uma linha.	76
Figura 34 - Diagrama esquemático da imagem da amostra girada.....	77
Figura 35 - Fluxograma do método de interpolação <i>spline</i>	79
Figura 36 – Hardware Arduino Uno com o sensor DHT 22.....	81
Figura 37 - Esquema de ligação do sensor DHT 22 no hardware Arduino Uno.....	82
Figura 38 – Diagrama de conexão Elétrica do sensor DHT 22.	82
Figura 39 – Processo de comunicação do sensor DHT 22.	83
Figura 40 – Esquema de pinagem do sensor DHT 22.	83

Figura 41 – IDE Arduino versão 1.8.3.	84
Figura 42 – Software desenvolvido para a leitura em tempo real.....	85
Figura 43 - Medidor de umidade e temperatura do tipo bastão para validação dos sensores.....	86
Figura 44 - Transmissor ZABTM - 3000 de até 3km de alcance.	87
Figura 45 - Módulo wireless transceiver 2,4 GHz.....	88
Figura 46 - Comparativos das dimensões dos sensores.....	89
Figura 47 - Sensor SHT 11 da Sensirion™.	90
Figura 48 - Sensor Ibutton1923.....	92
Figura 49 - Leitor de iButton DS9490B com interface USB.....	92
Figura 50 - Sensor de temperatura e umidade DHT 22.	93
Figura 51 - Preparação dos corpos de prova para leitura.	95
Figura 52- Inserção e selamento do sensor no furo.	95
Figura 53- Corpos de prova modificados.	97
Figura 54- Corpo de prova moldado com orifícios.....	97
Figura 55 - Corpos de prova dentro da estufa.....	98
Figura 56- Impermeabilização dos corpos de prova.....	99
Figura 57 - Vedação dos orifícios.....	99
Figura 58 - Procedimento para leitura de umidade e temperatura no interior do concreto.	101
Figura 59 - Corpos de prova das décadas de 1960 a 1970, no LCEC.....	101
Figura 60 - Verificação da umidade interna no concreto.	102
Figura 61 – Corpo de prova com vários padrões de grade.	102
Figura 62 – Leitura da UR no iButton 1923 com o DS9490B.	104
Figura 63 – Ampliação para verificação de oscilação nos dados do sensor iButton.	104
Figura 64 - Leitura da temperatura no iButton 1923 com o DS9490B.....	105
Figura 65 - Ampliação para verificação de oscilação nos dados do sensor iButton.	105
Figura 66 - Pilar do LCEC onde foi medida a umidade interna no concreto.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Casos de ocorrência de RAA no Brasil publicados.	21
Tabela 2 - Alguns marcos históricos selecionados no desenvolvimento de sistemas de controle.....	31
Tabela 3 - Especificações do hardware Arduino Uno.....	42
Tabela 4 - Erro na tensão causada pela rotação.....	78
Tabela 5 - Comparação dos valores obtidos pelos sensores.....	87
Tabela 6 - Especificações técnicas do transmissor ZAB™ - 3000.	88
Tabela 7 - Especificações do módulo wireless transceiver NRF 24L01.....	89
Tabela 8 - Especificações técnicas do sensor DHT 22.	93
Tabela 9 - Concreto utilizado no ensaio preliminar.	94
Tabela 10 - Traço do concreto utilizado (ensaio definitivo).	96
Tabela 11 - Características dos sensores.	103
Tabela 12 - Comparação das características dos sensores.....	103

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Critério da Correlação Cruzada
CCD	Dispositivo de carga acoplada
CID	Correlação de Imagens Digitais
CP	Corpos de prova
DSCM	Método de correlação digital da mancha
ILS	Algoritmo iterativo dos mínimos quadrados
LCEC	Laboratório CESP de Engenharia Civil
LSC	Correlação de mínimos quadrados
NR	Algoritmo de Newton-Raphson
PSSD	Critério da soma paramétrica da diferença quadrática
PSSDab	Critério da soma paramétrica do quadrado critério de diferença com dois parâmetros adicionais
RAA	Reação álcali-agregado
RAS	Reação álcali-sílica
RDI	Região de interesse
SAD	Critério da soma da diferença absoluta
SHD	Critério da soma das distâncias Hamming
SSD	Critério da soma da diferença quadrática
STBD	Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
TA	Tomada d'água
Unesp	Universidade Estadual Paulista
UR	Umidade relativa
ZNCC	Critério de correlação cruzada média zero
ZNSSD	Critério da soma normalizada média zero do critério da diferença quadrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Contextualização e Motivação.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
3. JUSTIFICATIVA.....	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1. Reações álcali-agregados	22
4.1.1. Monitoramento da umidade relativa e temperatura	26
4.2. Sistema de controle e projeto.....	28
4.3. Controle digital utilizando processamento digital de sinal (DSP).....	33
4.4. Automação de baixo custo	37
4.4.1. Escolha dos sensores de UR e temperatura.....	42
4.5. Câmeras digitais e a correlação de imagens digitais (CID).....	42
4.5.1. 2D-CID	53
4.5.2. Erro no CID	63
4.6. Métodos de medição e análise de deformação óptica.....	65
4.6.1. Método da correlação digital da mancha (DSCM).....	66
4.6.2. Método de detecção de borda retangular e os níveis de pixel e subpixel	69
4.6.3. Montagem gaussiana e interpolação spline	73
5. MATERIAIS E MÉTODOS	81
5.1. Hardware e software	81
5.1.1. Sensores utilizados	85
5.2. Sistema de monitoramento de umidade e temperatura.....	94
5.3. Sistema de monitoramento de deslocamentos.....	102
6. RESULTADOS E ANÁLISE	102
6.1.1. Respostas dos sensores avaliados.....	103
6.2. Umidade relativa no interior do concreto com mais de 40 anos de idade	108
6.3. Comparação dos métodos de correlação de imagens	109
7. CONCLUSÕES.....	111
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

1 INTRODUÇÃO

Esta pesquisa é resultado de um Programa e Desenvolvimento (P&D) da Companhia Energética do Estado de São Paulo (CESP) no Laboratório de Engenharia Civil (LCEC) juntamente com a UNESP, Câmpus de Ilha Solteira - SP, e a empresa de consultoria Deseq, com recursos financeiros da ANEEL, para o estudo da RAA em Usinas Hidroelétricas. O estudo foi feito em conjunto com informações de outra pesquisa que estava sendo feita com os CPs de concreto e tinha como objetivo de verificar a eficiência de impermeabilizantes quando os CPs fossem para ambientes úmidos, onde a ocorrência da RAA se manifestaria.

1.1 Contextualização e Motivação

O monitoramento de estruturas de grande porte como usinas hidrelétricas sempre esteve presente e é uma atividade de grande importância para este tipo de construção e estruturas de concreto possuem vida útil longa desde que se mantenham as características dos materiais constituintes sem alterações ou manifestações patológicas.

As manifestações patológicas nas construções, em muitos casos, têm suas origens em decorrência de fatos ou deficiências técnicas que poderiam ser detectadas na fase de estudos preliminares, devendo ser considerados aspectos relativos aos componentes do concreto, ao ambiente de exposição da estrutura e em possíveis falhas decorrentes do processo de execução. (MIZUMOTO, 2009).

A Reação Álcali-Agregado (RAA) pode ser definida como um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto. (HASPARYK, 2005, p. 35)

A reação álcali-sílica (RAS) é uma reação química no concreto ou argamassa entre íons hidroxílicos dos álcalis (sódio e potássio) de cimento hidráulico (ou outras

fontes) e certas rochas e minerais siliciosos, como opala, chert, quartz microcristalino e vidro vulcânico ácido, presente em alguns agregados. Esta reação desenvolve um gel de sílica alcalina podendo, em determinadas circunstâncias, levar a expansão anormal e à fissuração do concreto. Este fenômeno ataca severamente o desempenho da durabilidade das estruturas de concreto. A RAA é conhecida como o "câncer" no concreto e sendo a principal causa de deterioração do concreto nos EUA.

Utilizar um método capaz de acompanhar o desenvolvimento das RAA é muito importante, visto que, o monitorando das fissuras decorrentes da mesma, podem prever ou realizar tomadas de decisões em tempo hábil para serem efetuados reparos ou reforços estruturais, evitando, por exemplo: a expansão do concreto na entrada do vertedouro fazendo com que haja uma diminuição da seção transversal da comporta ocasionando o travamento da abertura ou fechamento, dispendendo muitos recursos econômicos para seu reparo depois da ocorrência.

O monitoramento das deformações e movimentações em diversos pontos da estrutura com precisão se constitui uma excelente solução para o monitoramento da RAA, com aquisição simples e rápida dos dados de umidade relativa e temperatura imediata ou para posterior processamento em computador, podendo ser utilizado em vários tipos de estruturas, inclusive em ensaios de laboratório substituindo os extensômetros (strain-gages) tradicionais, resguardadas as proporções.

Segundo Stark (1991), a umidade e a temperatura são os principais ativadores da RAA. O monitoramento dessas variáveis no concreto baliza a interferência humana na busca pelas soluções do problema rapidamente, antes do colapso da estrutura.

Neste trabalho foi implementado um sistema de monitoramento de baixo custo de UR e temperatura para utilização em usinas hidroelétricas a partir de uma pesquisa e desenvolvimento (P&D) da CESP, UNESP, ANEEL e a empresa de consultoria Deseq, para verificar os fatores responsáveis por desencadear as reações deletérias no concreto devido a RAA.

Outra análise no estudo foi a correlação de imagens para levantamento de deformações, a evolução dos computadores e o aumento na resolução das câmeras digitais, ampliou-se a utilização do método de Correlação de Imagens Digitais (CID) com melhor precisão na medição de deformações e deslocamentos, antes medidos pontualmente por extensômetros, relógios comparadores, etc., o método consiste

em monitorar o movimento dos pontos escolhidos em uma sequência de imagens digitais a partir de uma referência inicial.

Com a melhora dessa precisão pode-se utilizar a ferramenta CID para uma análise mais detalhada dos deslocamentos ocorridos em seções de uma estrutura sujeita a reações álcali agregados. Uma das principais vantagens deste método é não ser invasivo e não precisar da retirada de amostras do local em estudo, não é necessário fixar instrumentos no local que se deseja medir, as imagens são gravadas durante o monitoramento e processadas posteriormente gerando os deslocamentos da estrutura.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos:

- Apresentar o desenvolvimento das reações álcali-agregados e verificar se a umidade relativa é mesmo preponderante (da necessidade de monitoramento criterioso) para a formação da RAA em obras hidráulicas;
- Implementar uma solução de baixo custo para o monitoramento da umidade e temperatura interna do concreto em usinas hidroelétricas que apresentam a RAA;
- Levantar os métodos mais utilizados pela técnica CID para o possível monitoramento das fissuras decorrentes da RAA.

3 JUSTIFICATIVA

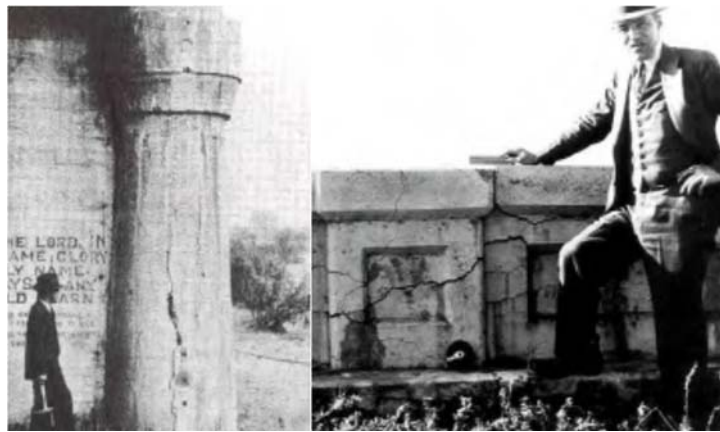
As soluções encontradas na literatura as RAA são de alto custo e muitas vezes difíceis de serem implantadas em obras de grande vulto como as usinas hidroelétricas brasileiras, com o acesso cada vez maior do aumento da resolução das câmeras digitais pode-se ter dados mais confiáveis nos deslocamentos de pontos em uma estrutura de concreto utilizado da técnica CID.

Em função das dificuldades encontradas nas usinas hidroelétricas de monitorar as fissuras ocasionadas pela RAA com as técnicas usuais (extensômetros, acelerômetros, LVDTs, medidores tri-ortogonais, etc.) este trabalho tem como objetivo secundário fazer o levantamento das técnicas de correlação de imagens digitais (CID) para o monitoramento dessas fissuras, verificando se atualmente esses métodos podem ser utilizados para essa finalidade em usinas hidroelétricas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1916, já haviam estudos isolados da RAA, no entanto, Thomas Edson Stanton que foi considerado o primeiro pesquisador a levantar a hipótese de que a grande quantidade de fissuras ocorridas em rodovias e pontes, com mostra a figura 1, utilizando concreto na costa da Califórnia se associava a interação entre os agregados e a solução de álcalis gerada no processo de hidratação do cimento. (PREZZI et al., 1997).

Figura 1 – Estrutura comprometida pela RAA.



Fonte: Mizumoto (2009).

A sustentação desta hipótese nos anos 40, foi evidenciada em trabalhos subsequentes de Berkey, Hansen, Meissner e Stanton et al. (PREZZI et al., 1997). A pesquisa pioneira de Stanton (1940) despertou gradativa preocupação sobre o assunto em função do diagnóstico da RAA em diversas estruturas de concreto no mundo.

Entre 1940 e 1941, os Estados Unidos iniciaram pesquisas em centros científicos, universidades e empresas de cimento em função da constatação da RAA em várias barragens importantes (Parker, Sterwart Mountain e Gene Wash, entre outras), e em obras de arte e rodovias. No mesmo período, na Austrália, iniciou-se um programa de pesquisas coordenado pelo CSIRO – *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*, tendo como foco principal o entendimento do mecanismo da RAA. Na Dinamarca no início da década de 1950, na Alemanha Ocidental no início dos anos 1960 e no Reino Unido em meados da década de 1970.

Na África do Sul a reação foi notada em 1974, mas as pesquisas sobre o assunto tiveram início no país apenas em 1977. No início dos anos 80 no Japão, na Índia em 1983 foi diagnosticada em duas barragens de concreto. Na década de 90, a China noticiou casos de deterioração de estruturas afetadas, iniciando-se a partir daí uma avaliação de suas jazidas e preocupação quanto à produção de cimento, apesar dos estudos sobre o tema reportarem os anos 60. (MIZUMOTO, 2009).

Desde então muitas pesquisas foram desenvolvidas no mundo inteiro e grande parte do conhecimento moderno foi se acumulando nos congressos ICAAR (*International Conference on Alkali Aggregate Reaction*), cuja primeira edição foi na Dinamarca, em 1974, o Brasil sediou a edição de 2016, realizada pela primeira vez na América Latina, a 15ª Conferência Internacional sobre a Reação Álcali-Agregado que aconteceu de 3 a 7 de julho, no Maksoud Plaza Hotel, em São Paulo, com realização conjunta do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e da Unesp de Ilha Solteira - SP. (BATTAGIN, 2016).

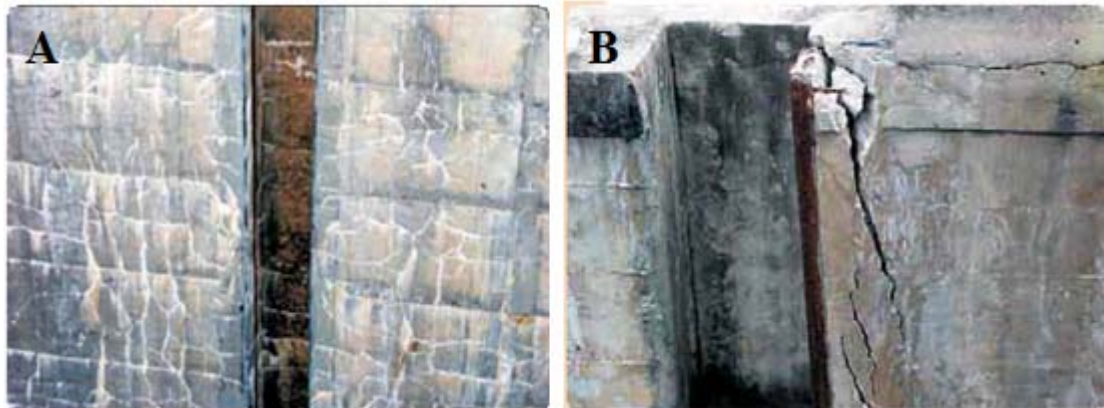
Segundo Hasparyk (2006) os principais relatos de ocorrência mostram danos em edifícios, pontes e viadutos, obras portuárias, centrais termoelétricas, obras hidráulicas, barragens, centrais hidroelétricas e túneis. A figura 2 mostra a RAA no vertedouro da barragem de Pirapora, localizada em Pirapora de Bom Jesus, em São Paulo, conforme Sollero (2016). A figura 3 mostra a fissuração na eclusa do tipo mapa (a) e devida à expansão no concreto de tomada d'água restringida por perfil metálico. (HASPARYK, 2006).

Figura 2 - Fissuras nos vertedouros da barragem e fissuras aleatórias no topo do contraforte.



Fonte: Sollero (2016).

Figura 3 – (A) Fissuração tipo mapa em parede de eclusa, (B) Fissuração devido à expansão da RAA no concreto restringida pelo perfil metálico em tomada d'água.



Fonte: Hasparyk (2006).

Atualmente, em razão do grande número de estruturas afetadas em diversos países, várias pesquisas sobre a RAA vêm sendo realizadas, visando um melhor entendimento dos mecanismos da reação, as características reativas dos agregados, o comportamento estrutural de obras afetadas e a ação e efeito da utilização de produtos inibidores.

Segundo Hasparyk (2006), no Brasil, o primeiro caso de RAA em barragem foi constatado na década de 1970, na Usina Hidroelétrica de Peti, em Minas Gerais, em seguida, o caso de Moxotó, no estado de Alagoas em 1983 e uma série de outras barragens.

Na tabela 1 têm-se alguns casos de ocorrência da RAA em barragens no Brasil publicados no meio técnico, bem como o período da construção.

Tabela 1 - Casos de ocorrência de RAA no Brasil publicados.

1920 a 1929	Ilha dos Pombos
1930 a 1939	Jurupará, Pedro Beicht, Ribeirão do Campo, Billings/Pedras
1940 a 1949	Peti, Traição
1950 a 1959	Sá Carvalho, Mascarenhas de Moraes, Paulo Afonso I
1960 a 1969	Paulo Afonso II, Pedra, Furnas
1979 a 1980	Apolônio Sales (Moxotó), Atibainha, Cascata, Sobradinho, Jaguará, Jaquari, Joanes, Paiva Castro, Paulo Afonso III, Paulo Afonso IV, Porto Colômbia, Tapacurá.

Fonte: Hasparyk (2006).

Na década de 60, houve um grande desenvolvimento da tecnologia do concreto em função da construção das grandes hidroelétricas, surgindo problemas decorrentes da RAA e a necessidade de estudos laboratoriais da mesma.

A CESP – Companhia Energética de São Paulo destacou-se na época pelo estudo do comportamento da RAA, sendo a primeira empresa a realizar estudos com inibidor pozolânico e empregá-lo no concreto produzido para as obras da UHE Engenheiro Souza Dias (Jupiá). (MIZUMOTO, 2009).

No ano de 1996, foram identificadas pela SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo S.A - inúmeras fissuras na estrutura de concreto da tomada d'água do túnel 6 - Sistema Cantareira. Os estudos realizados pela empresa Themag Engenharia identificaram as anomalias relacionadas à RAA e a ocorrência de comportamentos expansivos diferenciados em locais específicos de cada elemento de concreto. (KUPERMAN et al., 1997).

Em 2004, em função do interesse observado na inspeção de sapatas e blocos de fundação após o colapso no edifício Areia Branca, constatou-se um dos primeiros casos da reação em obras prediais nas regiões metropolitanas de Olinda e Recife/PE. Este incidente despertou a preocupação do meio técnico quanto à importância dos conceitos de vida útil e durabilidade das construções. Em virtude do ocorrido, foram realizadas inspeções em fundações de diversos prédios da Grande Recife, verificando-se erros de execução e degradação por fissurações ligadas à RAA. (OLIVEIRA, 2007).

4.1 Reações álcali-agregados

Segundo Kishore (1990), a reação álcali-sílica (RAS) no concreto é uma reação entre certos constituintes siliciosos no agregado e o hidróxido alcalino-sódico e de potássio que são liberados durante a hidratação do cimento Portland. É formado um produto gelatinoso que absorve o fluido dos poros e, assim, se expande, deixando o concreto tensionado internamente. O gel causará danos ao concreto somente quando as seguintes três condições ocorrerem simultaneamente.

- Uma forma reativa de sílica está presente no agregado em quantidades significativas;

- Os íons de sódio, potássio e hidróxido estão presentes nos poros dentro do concreto;
- A água está disponível a partir de uma fonte externa.

O problema da reação álcali-silica pode ser resolvido com:

- Uso de agregados não reativos;
- Uso de cimento de baixo teor alcalino, ou seja, cimento com um teor equivalente de óxido de sódio (Na_2O) de 0,6% em massa ou menos. Não é permitida qualquer contribuição alcalina de fontes diferentes do cimento Portland;
- Limitar o teor de cimento a 500 kg/m^3 ;
- Uso de pozzolana, escória e outras adições minerais para substituição parcial de cimento;
- Uso de sais inibidores de RAS;
- Controle de condições de serviço, chamado de prevenção de contato entre concreto e qualquer fonte externa de umidade.

As causas mais comuns de deterioração no concreto estrutural com reforço de aço são:

- Carbonatação e penetração de cloreto levando a corrosão de aço, resultando em rachaduras e fissuras na cobertura de concreto;
- Cobertura inadequada da armadura de aço;
- Congelamento e descongelamento;
- Ataque de sulfato;
- Reação álcali-agregado.

Existem três tipos de reações de agregados alcalinos, as reações álcali-silica, álcali-silicato e álcali-carbonato. A deterioração devido à reação álcali-silica é mais comum. (KISHORE, 1990).

A reação álcali-silica (RAS) é a reação química entre álcalis nos poros de materiais à base de cimento Portland e minerais siliciosos reativos, amorfos, tensos

ou criptocristalinos (opal, obsidiana, cristobalita, tridimita, calcedônia e chert) que podem estar presentes em agregados. O produto desta reação é o gel RAS, que, na presença de alta umidade nos poros do concreto, se expande e provoca microfissuras internas na estrutura. Este é um processo complexo e informações precoces sobre a formação e expansão de gel RAS seriam muito úteis para prever e prevenir danos futuros.

O gel RAS (Si-O-Na, K) formado é higroscópico e absorve água da pasta de cimento circundante, levando a expansão de gel, fissuração progressiva e, eventualmente, causa perda de capacidade de manutenção e, em alguns casos, colapso da estrutura. Assim, a presença de umidade (isto é, umidade relativa interna) é um requisito crítico para a formação de gel RAS. É relatado em que o dano estrutural devido a RAS é improvável que ocorra abaixo de uma umidade relativa interna (UR) de aproximadamente 80%. Em outras palavras, deve haver umidade suficiente para a formação de gel RAS. Quando totalmente desenvolvido, este tipo de caracterização de materiais pode ser potencialmente utilizado como um meio para detectar e monitorar a produção de gel RAS. (HASHEMI, 2015).

Durante muitos anos, os pesquisadores têm usado técnicas ultrassônicas para avaliação de propriedades de concreto e para a detecção de dano no concreto. A velocidade de pulso ultrassônica (UPV) é uma das técnicas do gênero mais populares, visto que, pode ser facilmente implementada e em parte porque está intimamente relacionada ao módulo de elasticidade do concreto. A UPV é utilizada para o monitoramento e contribuir para soluções que diminuam o progresso do dano da RAS. No entanto, o método UPV também foi relatado como não tão sensível quanto outros. (GONG, 2014).

A reação alcalina-sílica (RAS) é uma causa comum de deterioração do concreto. A água na presença de agregados reativos desempenha um papel importante na reação e na formação e expansão do gel deletério produzido. Como os sinais de micro-ondas são sensíveis a presença de água em materiais dielétricos, técnicas de caracterização de materiais por micro-ondas têm potencial para detectar e monitorar o gel RAS em estruturas de concreto. Os modelos de mistura dielétrica são modelos baseados em física que relaciona macroscopicamente (isto é, efetivo) a constante dielétrica de um material à constante dielétrica de seus constituintes e seus respectivos conteúdos volumétricos. (HASHEMI, 2017).

Segundo Albertini (2014), durante os estudos para escolha da textura do concreto e dimensões dos corpos de prova para o experimento que avaliou a eficiência dos impermeabilizantes, foi notado que havia bastante dificuldade para evaporar a água presente no interior do concreto. Na ocasião, foi constatado que até mesmo para concretos bastante permeáveis (permeabilidade K na faixa de 10^{-6} e 10^{-4} cm/s) foram necessários pelo menos 15 dias ininterruptos em estufa a 60°C , para diminuir apenas 20% da umidade relativa.

É consenso no meio científico que a reação álcali-agregado ocorre se, e somente se, houver a ocorrência concomitante de três fatores: presença de minerais reativos no agregado, presença de álcalis na pasta de cimento e umidade suficientemente alta para propiciar a reação. Salienta-se, contudo, que outros fatores também podem afetar a reação, como a temperatura do ambiente, a porosidade do concreto e as condições da estrutura (tensões confinantes e presença de armaduras), resumidos na figura 4. (CARASEK, 2016).

Figura 4 - Principais fatores que influenciam a reação álcali-silica.



Fonte: Carasek (2016).

A temperatura também um fator importante de ser considerado na RAS por possuir um efeito cinético no fenômeno. A elevação da temperatura acelera o início e também a velocidade inicial da expansão e, conseqüentemente, as expansões e a deterioração da estrutura. (CARASEK, 2016).

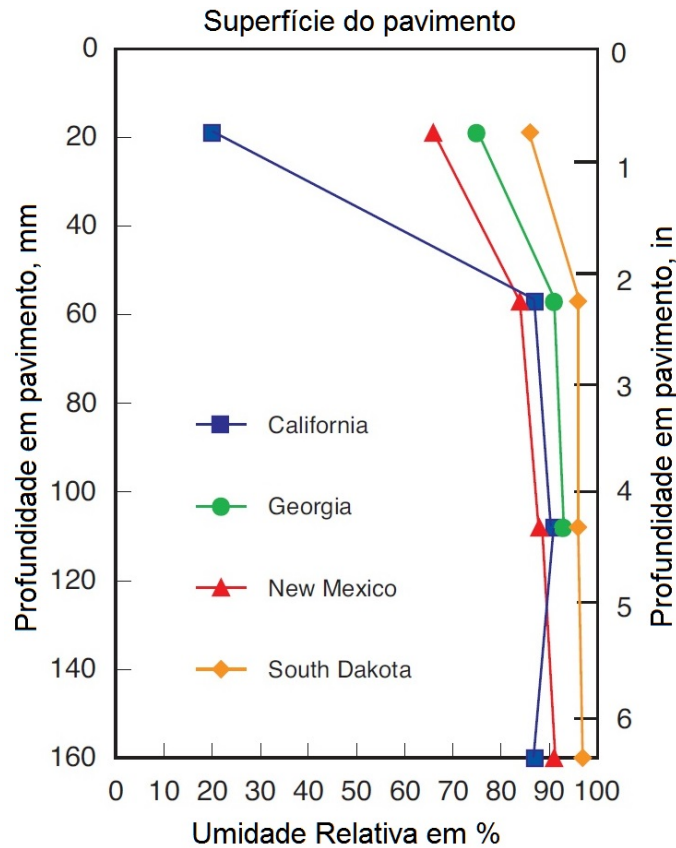
4.1.1 Monitoramento da umidade relativa e temperatura

Para Stark (1993), a absorção de umidade por produtos de reação de gel é o passo fundamental que causa a expansão do concreto devido ao RAS. Se a umidade no concreto for elevada demais pelos produtos de hidratação do cimento, a expansão não ocorrerá mesmo que a reação entre a solução de poro alcalino e o agregado silicioso tenha ocorrido. Uma medida conveniente de indicar a disponibilidade de umidade para absorção pelo gel RAS é a umidade relativa (UR). O trabalho anterior (STARK, 1991) determinou que os valores de RH acima de 80%, referenciados a 70 a 75°F (21 a 24°C), indicam que a umidade está suficientemente disponível para absorção pelo gel RAS e, nessa circunstância, é condição favorável para pode ocorrer a expansão.

Em geral, quanto maior a UR, maior o possível nível de expansão em um determinado concreto. Com 100% de UR, o aumento de volume do gel, pode variar significativamente, dependendo da relação água-cimento e porosidade do agregado. (STARK, 1993).

Segundo Farny (2007), a umidade permite a migração de íons alcalinos para locais de reação e o gel resultante absorve a umidade, levando à expansão. Por esta razão, a RAS deletéria não ocorre em concretos que estão secos em serviço. A pesquisa mostrou que a RAS expansiva pode ocorrer em concreto com uma umidade relativa acima de 80%. No entanto, é possível que o concreto bem curado em regiões áridas tenha uma umidade relativa constante ou superior a 80% logo abaixo da sua superfície, como mostra a figura 5.

Figura 5 - Umidade relativa versus profundidade de concreto para pavimento em vários climas.



Fonte: Adaptado de Farny (2007).

O monitoramento da umidade e temperatura interna do concreto em barragens hidroelétricas sempre foi considerado necessário para tomar medidas à contenção das RAA, uma vez que, essas estruturas estão sujeitas à umidade permanente.

De acordo com Lopes (2004), devido ao fato de a água ser um dos fatores determinantes da existência da RAA, as obras hidráulicas são as mais suscetíveis de apresentarem esse tipo de problema. Em barragens, os problemas mais comumente observados são a abertura de juntas, movimentações diferenciais, perda de estanqueidade e problemas operacionais.

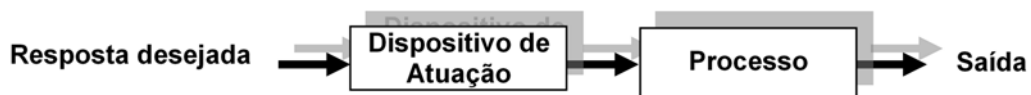
4.2 Sistema de controle e projeto

Um sistema de controle é uma interconexão de componentes formando uma configuração que produzirá uma resposta desejada. O objetivo permanente do sistema de controle é prover ampla flexibilidade e nível elevado de autonomia.

A relação de entrada-saída representa uma relação de causa e efeito do processo, que, por sua vez, representa um processamento de um sinal de entrada para fornecer um sinal de saída variável, quase sempre com uma amplificação de potência. (DORF, 2001).

Um sistema de controle a malha aberta utiliza um dispositivo de atuação para controlar diretamente o processo sem usar retroação. A figura 6 mostra um sistema de controle em malha aberta.

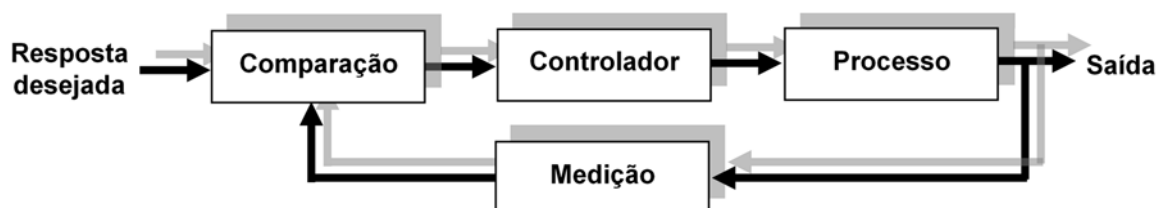
Figura 6 - Sistema de controle a malha aberta (sem retroação).



Fonte: Adaptado de DORF (2001).

Um sistema de controle a malha fechada usa uma medida da saída e a retroação deste sinal para compará-lo com a saída desejada (referência ou comando). A figura 7 mostra o sistema de controle a malha fechada (com retroação).

Figura 7 - Sistema de controle a malha fechada (com retroação).



Fonte: Adaptado de DORF (2001).

Para obter um controle maior na acurácia, o sinal é enviado à entrada e comparado com a entrada de referência, e um sinal de atuação proporcional à diferença entre a entrada e a saída é enviada ao sistema para a correção do erro. (KUO, 2003).

Segundo DORF (2001, p.3):

[...] As primeiras aplicações do controle com retroação apareceram no desenvolvimento do mecanismo regulador de bóia na Grécia no período entre 300 a 1 a.C. O relógio d'água de Ktesibios usava um regulador de bóia [...] Um lampião de óleo inventado por Philon aproximadamente a 250 a.C. usava um regulador de bóia para manter constante o nível do óleo combustível. Heron de Alexandria, que viveu no primeiro século d.C., publicou um livro intitulado Pneumática, que ressaltava algumas formas de mecanismos de nível de água usando reguladores de bóia.

O primeiro sistema com retroação inventado na Europa moderna foi o regulador de temperatura de Cornelis Drebbel (1572-1633), da Holanda [...] Denis Papin (1647-1712) inventou o primeiro controlador de pressão para caldeiras a vapor em 1681. O primeiro controlador automático com retroação usado em um processo industrial é geralmente aceito como sendo o regulador de esferas de James Watt, desenvolvido em 1769 para controlar a velocidade de máquinas a vapor. (DORF, 2001).

Na Rússia, o primeiro sistema com retroação foi o regulador de bóia para nível d'água, supostamente inventado por I. Polzunov em 1765. O período anterior a 1868 foi caracterizado pelo desenvolvimento do sistema de controle automático através da intuição e invenção. J. C. Maxwell formulou uma teoria matemática relativa à teoria de controle usando um modelo de um regulador sob forma de equação diferencial, durante o mesmo período, I. A. Vyshnegradskii formulou uma teoria matemática de reguladores. Antes da Segunda Guerra Mundial, a teoria e a prática de controle se desenvolveram nos Estados Unidos e no Oeste da Europa de maneira diferente da que ocorreu na Rússia e no Leste Europeu.

O principal incentivo para o uso da retroação nos Estados Unidos foi o desenvolvimento do sistema telefônico e dos amplificadores eletrônicos com retroação de Bode, Nyquist e Black, nos Laboratórios da Bell Telephone.

A teoria e a prática do controle automático receberam grande estímulo durante a Segunda Guerra Mundial quando se tornou necessário projetar e construir pilotos automáticos para aviões, sistemas de posicionamento de canhões, sistemas de controle para antenas de radar e outros sistemas militares baseados na abordagem do controle com retroação. (DORF, 2001).

Antes de 1940, na maioria das vezes, o projeto de sistemas de controle era uma arte que envolvia abordagem de ensaio e erro. Durante os anos de 1940, métodos matemáticos e analíticos aumentaram em número e utilidade, e a

engenharia de controle se constituiu por si mesma uma área específica da engenharia. As técnicas de domínio da frequência continuaram a dominar o campo de controle logo após a Segunda Guerra Mundial com o aumento do uso da Transformada de Laplace e do plano de frequência complexa.

Durante os anos de 1950, a ênfase na teoria da engenharia de controle foi o desenvolvimento e o uso de métodos no plano S e, particularmente, a abordagem do lugar das raízes. [...] Durante os anos de 1980, a utilização de computadores digitais como componentes de controle tornou-se rotina. A tecnologia destes novos elementos de controle para executar cálculos rápidos e precisos era anteriormente indisponível para os engenheiros de controle[...]. A tabela 2 mostra alguns marcos históricos selecionados no desenvolvimento de sistemas de controle. (DORF, 2001).

Tabela 2 - Alguns marcos históricos selecionados no desenvolvimento de sistemas de controle.

1769	Desenvolvimento da máquina a vapor e do regulador de esferas de James Watt. A máquina de vapor de Watt é usada frequentemente para assinalar o início da Revolução Industrial na Grã-Bretanha. Durante a Revolução Industrial foram realizados grandes esforços no desenvolvimento da mecanização, uma tecnologia precedente da automação.
1800	O conceito de intercambiabilidade de partes manufaturadas de Eli Whitney foi demonstrado na fabricação de mosquetões. O desenvolvimento de Whitney é muitas vezes considerado o início da produção em massa.
1868	J. C. Maxwell formula um modelo matemático para o controle regulador de uma máquina a vapor.
1913	Introdução da máquina de montagem mecanizada de Henry Ford para a produção automobilística.
1927	H. W. Bode analisa amplificadores com retroação.
1932	H. Nyquist desenvolve um método para analisar a estabilidade de sistemas.
1952	Desenvolvido o Comando Numérico (CN) no Instituto de Tecnologia de Massachusetts para o controle dos eixos de máquinas ferramentas.
1954	George Devol desenvolve a “transferência programada de itens” considerado o primeiro projeto de robô industrial.
1960	Introduzido o primeiro robô Unimate, baseado nos projetos de Devol. O Unimate foi instalado em 1961 para alimentar máquinas de embutimento.
1970	Desenvolvidos modelos em variáveis de estado e o controle ótimo.
1980	Estudado amplamente o projeto de sistemas de controle robusto.
1990	As empresas orientadas para a exportação de produtos manufaturados enfatizam a automação.
1994	O controle com retroação é usado amplamente nos automóveis. Demanda da manufatura por sistemas robustos, confiáveis.

Fonte: Adaptado de DORF (2001).

Quanto ao projeto, cujo significado é o processo de conceber ou inventar formas, partes e detalhes de um sistema para alcançar um fim específico. O projeto de sistemas de controle é um exemplo específico de projeto de engenharia, a finalidade do projeto de engenharia de controle é obter configuração, as especificações e a identificação dos parâmetros-chave de um sistema proposto para atender a uma necessidade real. (DORF, 2001).

Projetar sistemas de controle exige que sejam seguidos alguns passos:

- Estabelecer a finalidade do sistema;
- Identificar as variáveis que se deseja controlar;
- Escrever as especificações em termos da exatidão que se deve alcançar.

O problema de se projetar um controlador é: dado um modelo de sistema a ser controlado (incluindo seus sensores e atuadores) e um conjunto de objetivos de projeto, encontrar um controlador adequado ou determinar que não existe nenhum.

Como um projetista, prossegue-se na primeira tentativa de configurar um sistema que conduza ao desempenho de controle desejado. Esta configuração de sistema consistirá, normalmente de um sensor, de um processo sob controle, de um atuador e de um controlador.

O próximo passo consiste em identificar um candidato a atuador, o passo seguinte é a seleção de um controlador, que quase sempre consiste de um amplificador somador que irá comparar a resposta desejada com a resposta real e em seguida encaminhar este sinal de medida de erro a um amplificador.

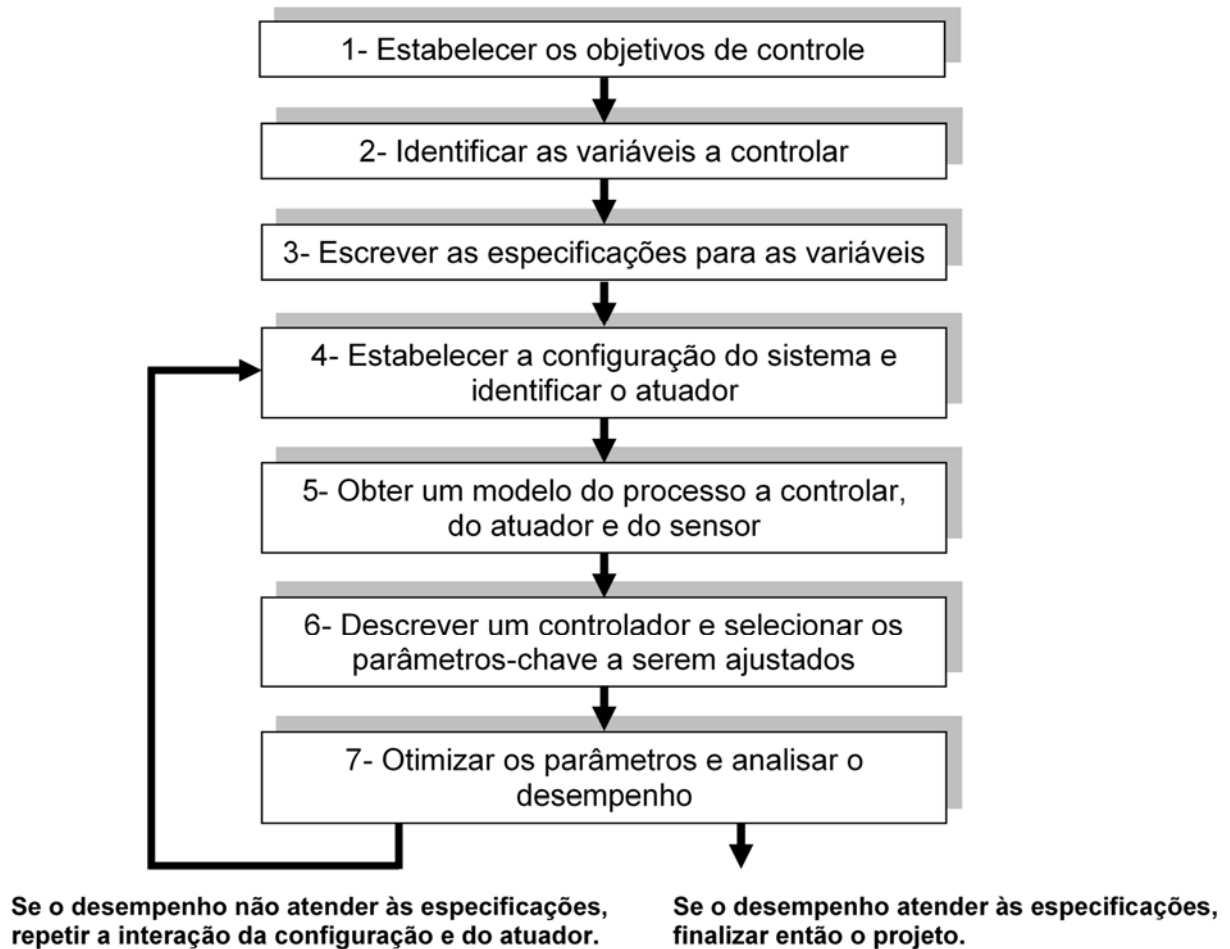
E o último passo é o ajuste dos parâmetros do sistema a fim de obter o desempenho desejado.

As especificações de desempenho descreverão como o sistema de malha fechada deverá se comportar e incluirão:

- Boa regulação contra perturbações;
- Respostas desejadas aos comandos;
- Sinais reais do atuador;
- Baixas sensibilidades;
- Robustez.

O procedimento de projeto de sistemas de controle está resumido na figura 8.

Figura 8 - O procedimento do projeto de sistemas de controle.



Fonte: Adaptado de DORF (2001).

4.3 Controle digital utilizando processamento digital de sinal (DSP).

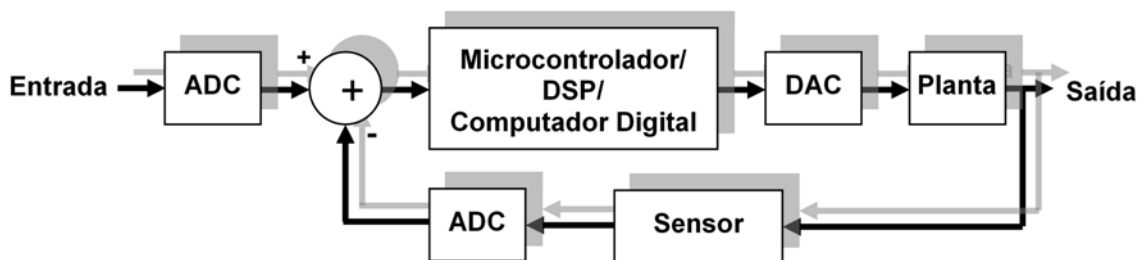
Tradicionalmente, o sistema de controle tem sido desenvolvido e analisado usando técnicas analógicas. Esses controladores eram implementados com componentes analógicos, como resistores, capacitores e amplificadores operacionais. Por causa do crescimento explosivo e a expansão eficiente da tecnologia digital, os controladores hoje, são implementados com hardware digital programável ou com programas em computadores digitais. (NEKOOGAR,1999).

Para ser utilizável em computadores digitais, sinais analógicos precisam ser amostrados e convertidos para forma digital por um conversor analógico-digital (A/D) (conhecido também como ADC). Depois de ser processado por um computador

digital, o sinal digital precisa ser convertido novamente para a forma analógica por um conversor digital-analógico (D/A) (ou DAC). Tal configuração de ADC's, DAC's, sistemas analógicos a serem controlados, sensores, e computadores digitais funcionando como controladores é chamado como sistema de amostragem de dados.

A figura 9 mostra uma configuração de um sistema de controle digital padrão por amostragem de dados.

Figura 9 - Diagrama de blocos de um sistema de controle padrão.



Fonte: Adaptado de NEKOOGAR (1999).

O processo de projeto consiste em seguir alguns passos descritos a seguir:

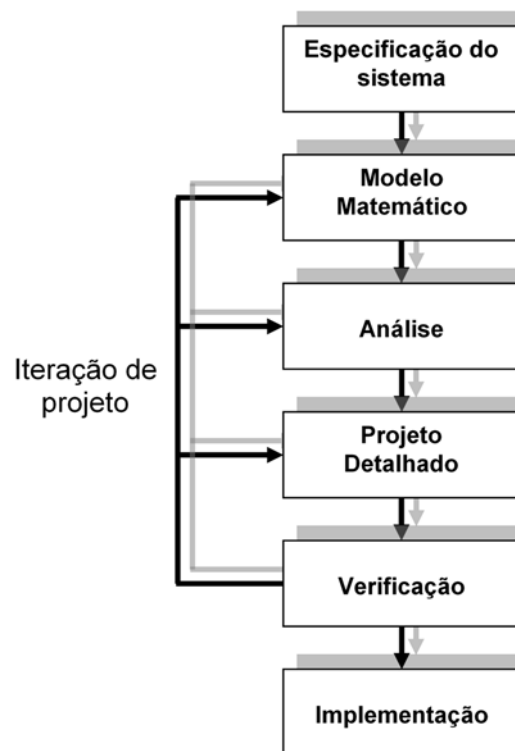
- **Especificação do sistema:** Especificação dos parâmetros de projeto para o desenvolvimento do sistema de controle. Estes parâmetros determinam a resposta dinâmica, acurácia das variáveis de estado, e estabilidade do sistema. Em ambos os domínios contínuo e discreto, projetos são usualmente especificados por parâmetros tal como tempo de pico, porcentagem de *overshoot*, tempo de estabelecimento, tempo de subida.
- **Modelo matemático de um sistema físico:** É utilizado o método clássico de controle que é o modelo da função de transferência. Porém, o modelo de função de transferência do sistema descreve somente as relações de entrada-saída do sistema. Um modelo mais completo é o das variáveis de estado. Este modelo prevê as relações entrada-saída, mas também a descrição interna do sistema.
- **Análise:** Um modelo de um sistema pode ser investigado por diferentes maneiras. Análises da representação matemática do sistema

revela importantes informações sobre o sistema. Isto inclui a análise de estabilidade e sensibilidade do sistema de controle.

- **Projeto Detalhado:** Controladores utilizando métodos de controle convencional e técnicas modernas. Algumas das mais recentes técnicas utilizam o controle com lógica fuzzy e estimador de estado.
- **Verificação:** Pacotes de simulação estão disponíveis para controle de sistemas digitais, entre eles o MATLAB™.
- **Implementação:** A implementação em DSP com controladores digitais em um único chip.

O processo de projeto para um sistema de controle digital é mostrado na figura 10.

Figura 10 - Processos para o projeto de um sistema de controle digital.



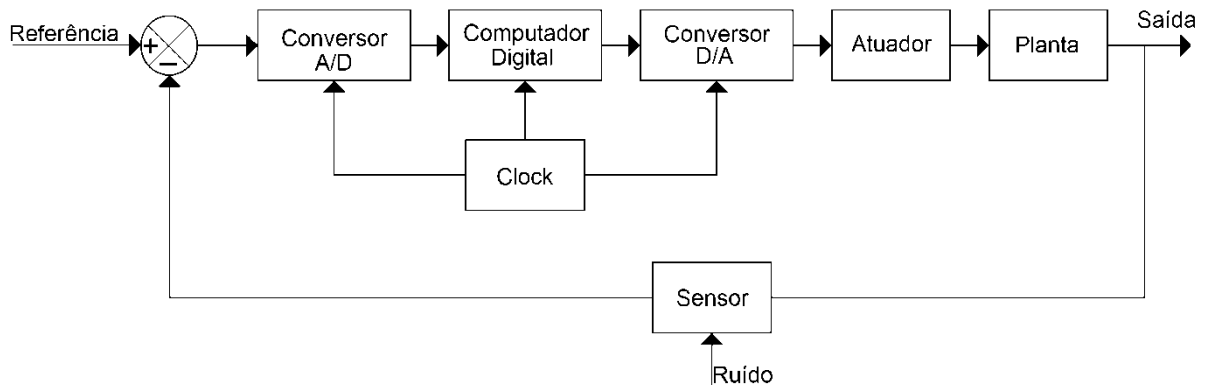
Fonte: Adaptado de Nekoogar (1999).

Os sistemas de controles digitais ou discretos diferem dos sistemas de controle contínuo porque seus sinais são amostrados no tempo. Um sinal discreto no tempo é um sinal definido em instantes discretos de tempo. (SILVA, 2007).

Segundo Silva (2007), [...] “o uso de controladores digitais requer quantização de sinais, tanto no tempo quanto na amplitude, por meio de um clock, que sincroniza o conversor A/D, microprocessador e D/A[...]”.

A figura 11 mostra o diagrama de blocos de um sistema de controle digital.

Figura 11 - Controle digital diagramado em blocos.



Fonte: Adaptado de Silva (2007).

Ainda segundo Silva (2007) uma das técnicas mais comuns para projetos de controladores digitais é a técnica de “emulação”. A partir da função de transferência do controlador analógico do sistema, respeitando os mesmos critérios de desempenho de projeto, faz-se uma emulação do controlador analógico.

Quanto ao procedimento de projeto para uso de emulação, o primeiro passo neste procedimento consiste em projetar um controlador analógico que, para um dado processo contínuo no tempo, sejam satisfeitos os critérios de desempenho propostos. Em resumo, consideram-se quatro passos:

- Passo 1: Projetar o controlador analógico;
- Passo 2: Escolher o período de amostragem, somando os elementos associados aos sistemas de controle digitais;
- Passo 3: Digitalizar a lei de controle;
- Passo 4: Simulação e avaliação do desempenho.

No Passo 1 se utiliza dos conhecimentos e teorias já existentes e dominadas de controladores em tempo contínuo. Em alguns casos este projeto de controlador

analógico já existe e é funcional, atendendo as necessidades de controle, e se pretende substituí-lo por um controlador digital.

O segundo ponto envolve a adição, ao sistema analógico, da dinâmica associada aos elementos que circundam uma estratégia de controle digital. Isto é, características do conversor A/D (modelado por um amostrador ideal), do conversor D/A (normalmente um zoh) e do filtro anti-aliasing. Note-se que o efeito das dinâmicas adicionais introduzidas pela retenção e filtragem podem ser consideradas no primeiro passo, tal como a deterioração da margem de fase.

Seguindo o segundo passo, uma frequência de amostragem apropriada deve ser selecionada. A seleção dessa frequência é feita com base na largura de banda de malha fechada ou na resposta ao degrau.

No terceiro passo, discretiza-se o controlador analógico, utilizando as técnicas apropriadas. (SILVA, 2007).

O desempenho do sistema desenvolvido é avaliado no quarto passo, considerando a estabilidade relativa do sistema de controle, respostas transitórias e em regime do sistema.

Com bons resultados na simulação, a função de transferência do controlador deve ser convertida numa equação diferencial, e serem transportadas para a linguagem de programação apropriada do processador a ser utilizado. E, dependendo da representação das variáveis utilizada no microprocessador (número de bits, tipo de variável utilizada, número de casas decimais, etc.), deve-se avaliar o efeito do arredondamento dos parâmetros do controlador, pois a precisão é finita no processador. As estratégias de implementação da equação diferencial ajudam a minimizar este efeito. (SILVA, 2007).

4.4 Automação de baixo custo

Há pouco tempo todo sistema de controle para automação era composto de componentes dedicados, compostos por circuitos integrados, resistores, capacitores, transístores, diodos, etc., criando-se circuitos que tinham possibilidades únicas de trabalho, caso houvesse a necessidade de alteração era preciso a confecção ou adaptação dos circuitos existentes.

Devido ao avanço na tecnologia, surgiram os computadores e estes começaram a fazer parte dos laboratórios, uma grande ferramenta para o desenvolvimento de sistemas de controle, armazenando informações, tomando decisões baseadas em algoritmos computacionais. Naquela época os computadores ocupavam um espaço considerável e processavam poucas informações.

No passo seguinte com a miniaturização dos componentes surgiram os microcomputadores, com maior poder de processamento e menores dimensões, começaram a ser uma alternativa viável para a automação e controle, mas ainda existia um problema, caso fosse necessário realizar um sensoriamento externo aos laboratórios, eram equipamentos muito sensíveis e com custo elevado para esta finalidade.

Surgiram então os hardwares e softwares de plataforma embarcada de código aberto fáceis de utilizar, exemplos mais comuns dessa plataforma são: o Arduino, o Raspberry Pi, o BeagleBone, etc.

O conceito Arduino surgiu na Itália, em 2005, com o objetivo de criar um dispositivo que fosse utilizado em projetos/protótipos construídos de uma forma menos dispendiosa do que outros sistemas disponíveis no mercado. (DI RENNA, 2013).

A ideia era fazer com que a placa interagisse com aplicações escolares. Em sua fase inicial, 50 mil unidades da plataforma foram vendidas. Basicamente, o Arduino é um microcontrolador, ou seja, ele é indicado para projetos eletrônicos e elétricos de controle de hardware, como sensores e motores, é um microcontrolador voltado à projetos com hardware. Como não possui sistema operacional é a plataforma ideal para automação de residências, como abrir portas de garagem ou acender as luzes remotamente, ou em projetos de robótica.

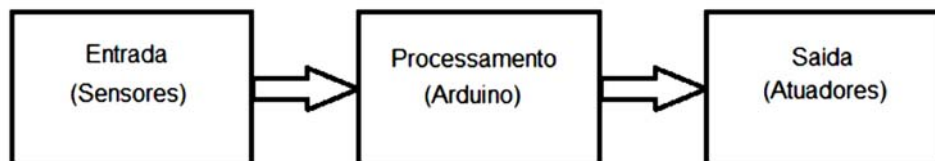
O Raspberry™ PI foi lançado em 2012 pela Raspberry Foundation para ajudar crianças no estudo de programação com baixo custo. A placa, do tamanho de um cartão de crédito, é um computador completo, com entrada para cabo de rede, áudio, vídeo e cartão microSD. O Raspberry™ Pi é um microprocessador ideal para desenvolvimento de software.

A terceira geração do Raspberry™ Pi (Raspberry™ Pi 3 model B) é um minicomputador que possui processador Quad Core 1.2GHz Broadcom™ BCM2837 64bit e 1 GB de memória RAM e suporta toda a gama de sistemas operacionais baseados em GNU/Linux™ e Windows™ 10 IoT Core.

Quanto aos microcontroladores Arduino, por ser um microcontrolador de ótima relação custo/benefício (\$ 22,00 nos EUA, <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>, acesso em 05/11/2017) ele foi escolhido para o monitoramento da RAA neste trabalho.

O Arduino é um kit de desenvolvimento, que pode ser visto como uma unidade de processamento capaz de mensurar variáveis do ambiente externo, transformadas em um sinal elétrico correspondente, através de sensores ligados aos seus terminais de entrada. De posse da informação, ele pode processá-la computacionalmente, podendo ainda atuar no controle ou no acionamento de algum outro elemento eletroeletrônico conectado ao terminal de saída. A figura 12 apresenta um diagrama de blocos de uma cadeia de processamento utilizando o Arduino. (DI RENNA, 2013)

Figura 12 - Diagrama de blocos de uma cadeia de processamento utilizando o Arduino.



Fonte: Adaptado de Di Renna (2013).

O microcontrolador pode ser usado para desenvolver artefatos interativos *stand-alone* ou conectados ao computador, utilizando diversos aplicativos, tais como: Adobe Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data ou SuperCollider.

O Arduino foi projetado com a finalidade de fácil programação e aplicação, além de multiplataforma, podendo ser configurado em ambientes Linux™, Mac™ OS e Windows™. Além disso, um grande diferencial deste dispositivo é ser mantido por uma comunidade que trabalha na filosofia “*open-source*”, desenvolvendo e divulgando gratuitamente seus projetos. (Di Renna, 2013).

Segundo Badamasi (2014), atualmente, esse kit de desenvolvimento é muito utilizado em programação de microcontroladores, entre outras coisas, devido à sua interface amigável ou ambiente de fácil utilização. Como qualquer microcontrolador o Arduino é uma placa de circuito com um chip que pode ser programado para fazer grande número de tarefas, a interface (IDE - *Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado) envia informações de um programa de

computador para o microcontrolador a fim de executar um comando específico. O Arduino pode ler informações de dispositivos de entrada, como por exemplo, sensores de impressão digital, temperatura, umidade, etc., antena, trimmer (potenciômetro), etc. e também pode enviar informações para dispositivos de saída, como LED, alto-falantes, Tela LCD, motor DC, transmissores de longa distância, etc. A figura 13 mostra o hardware Arduino versão Uno.

Figura 13 - Hardware Arduino Uno.











Fonte: Arduino Uno REV3 (2017)

A utilização da plataforma de prototipagem eletrônica de fonte aberta permitindo aos usuários a criação de objetos eletrônicos iterativos.

Existem várias versões do hardware de prototipagem Arduino, a figura 14 mostra as principais versões do hardware.

Figura 14 – Versões da placa de prototipagem Arduino.

	Arduino Uno	Arduino Mega2560	Arduino Leonardo	Arduino Due	Arduino ADK	Arduino Nano	Arduino Pro Mini	Arduino Esplora
								
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2.x) ou ATmega328 (versão 3.x)	ATmega168	ATmega32u4
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14	-
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6	-
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8	-
Memória	32 K (0,5 K usado pelo bootloader)	256 K (8 K usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)	512 K disponível para aplicações	256 K (8 K usados pelo bootloader)	16 K (ATmega168) ou 32K (ATmega328), 2 K usados pelo bootloader	16 K (2k usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)
Clock	16 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	84 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	8 Mhz (modelo 3.3v) ou 16 Mhz (modelo 5v)	16 Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial / Módulo USB externo	Micro USB
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Tensão de operação	5v	5v	5v	3.3v	5v	5v	3.3v ou 5v, dependendo do modelo	5v
Corrente máxima portas E/S	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA	40 mA	40 mA	40 mA	-
Alimentação	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	7 - 12 Vdc	3.35 - 12 V (modelo 3.3v), ou 5 - 12 V (modelo 5v)	5v

Fonte: Flop (2017).

O sistema foi constituído com o hardware e software de plataforma embarcada de código aberto Arduino Uno, na tabela 3, segue as especificações do hardware Arduino Uno.

Tabela 3 - Especificações do hardware Arduino Uno.

Microcontrolador	ATmega328P
Voltagem de Operação	5V
Voltagem de Entrada (recomendada)	7-12V
Voltagem de Entrada (limite)	6-20V
Pinos Digital I/O	14 (com 6 pinos de saída PWM)
Pinos PWM Digital I/O	6
Pinos de Entrada Analógica	6
Corrente DC por pino I/O	20 mA
Corrente DC para pino de 3.3V	50 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega328P) dessa 0.5 KB usada para <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidade de <i>Clock</i>	16 MHz
Comprimento	68.6 mm
Largura	53.4 mm
Peso	25 g

Fonte: Arduino Uno REV3 (2017)

4.4.1 Escolha dos sensores de UR e temperatura

Segundo Albertini (2014), para monitoramento das expansões causadas pela RAA, já se tem instalado equipamentos que permitem monitorar a taxa de expansão da estrutura de concreto da TA (tomada d'água) através de mensurações sobre a abertura e evolução das fissuras, o deslocamento diferencial entre blocos e a elevação da estrutura devido à expansão.

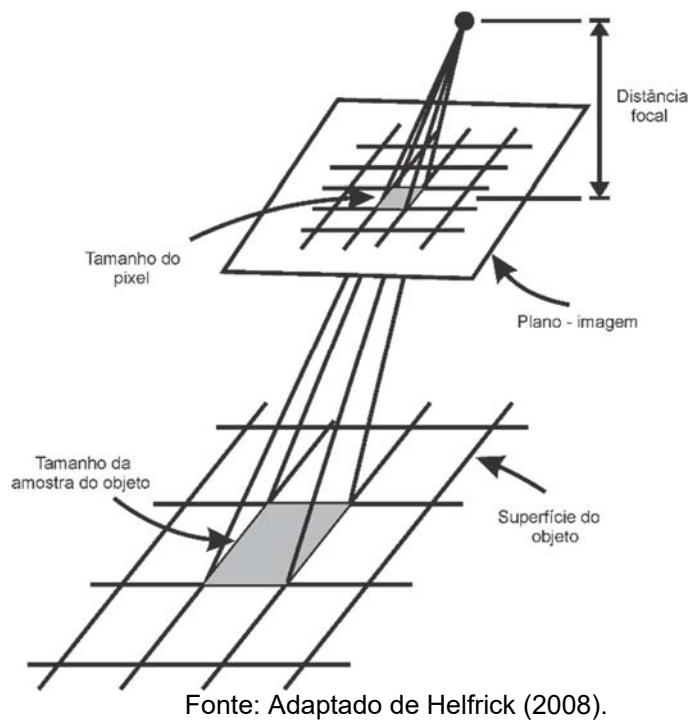
4.5 Câmeras digitais e a correlação de imagens digitais (CID)

Atualmente as câmeras digitais possuem complexos circuitos eletrônicos que são capazes de realizar operações que facilitam e simplificam a captura de uma boa imagem. Ferramentas de processamento de imagem veem sendo empregadas nestes circuitos a cada nova geração de câmeras, por exemplo, o foco automático, ajuste automático de brilho e contraste, controle de vibração no instante de captura da imagem, detecção de sorrisos ou faces (padrões) e várias outras funcionalidades que são liberadas pelos fabricantes das câmeras aos poucos no mercado. Mesmo

com a facilidade do uso destas funcionalidades, é necessária a compreensão de como estes ajustes são realizados. (SABINO, 2013).

As câmeras digitais são compostas basicamente de um conjunto de lentes, sensor de captura de luminosidade, processador e mídia de armazenamento de dados. Uma imagem digital consiste de uma matriz de pixels do tipo $M \times N$ em que cada elemento é um micro sensor de luz, transformando um sinal luminoso em sinal elétrico correspondente à intensidade luminosa na posição. A maioria destas matrizes são retangulares. O tamanho do pixel e a distância focal juntos determinam o tamanho da amostra do objeto, que é a projeção do tamanho do pixel no plano-objeto (figura 15).

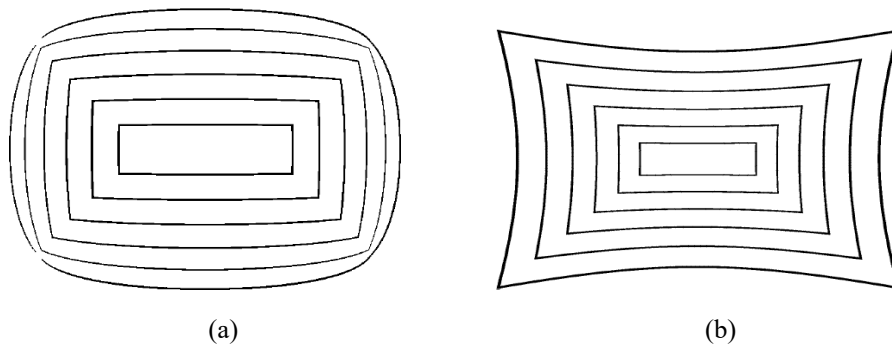
Figura 15 – Relação do tamanho do pixel com o tamanho de amostra do objeto.



Com o aumento da resolução pode-se diminuir o tamanho do pixel, obtendo mais informações de uma imagem, deve-se levar em consideração os ruídos que vem junto com a imagem. As lentes podem conter diferentes defeitos de fabricação que levam a distorções não-lineares nas imagens capturadas, como as distorções com efeitos barril e almofada (como são comumente chamadas estas distorções do tipo radial), sendo que a distorção do tipo barril faz com que as linhas retas pareçam estar encurvadas para fora da imagem, e a distorção do tipo almofada faz com que

as linhas retas pareçam estar encurvadas para dentro da imagem, conforme ilustradas nas figuras 16(a) e 16(b), respectivamente. (LOBÃO, 2004).

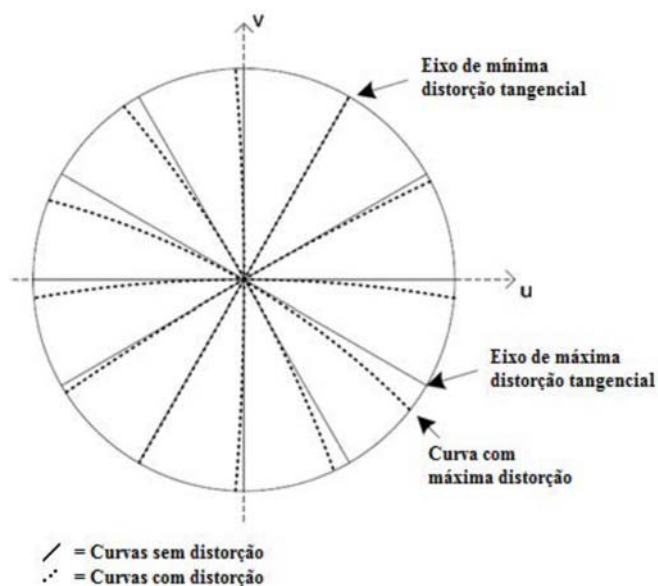
Figura 16 – (a) Efeitos “barril” e (b) “almofada” das lentes.



Fonte: Lobão (2004).

Outro tipo de distorção é a tangencial, como mostra a figura 17, que é essencialmente decorrente de fenômenos físicos normalmente designados como “prisma fino” e/ou “descentralização”, que são decorrentes da dispersão dos centros ópticos efetivos em diferentes regiões da lente ou conjunto de lentes utilizadas (LOBÃO, 2004).

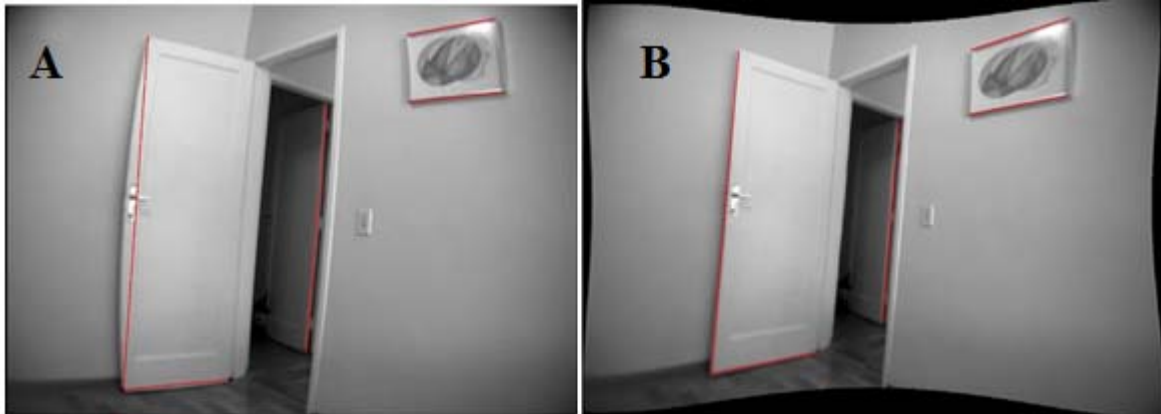
Figura 17 - Efeito de distorção tangencial de uma lente.



Fonte: Lobão (2004).

Na figura 18 é apresentada uma imagem original, com distorções, e a mesma imagem corrigida.

Figura 18 - Imagem original (A) com distorções e imagem distorcida (B).



Fonte: Lobão (2004).

O método de correlação digital de manchas (DSCM) tem sido amplamente utilizado na mecânica experimental para obter os campos de deformação superficial. Um dos desafios em aplicações práticas é como obter a alta precisão com muito menos complexidade computacional, Zhang (2003).

O princípio básico da DSCM é combinar dois padrões de manchas antes e depois da deformação. Com base na função de correlação predefinida, o procedimento de correspondência é completado através da busca na posição do pico da distribuição dos coeficientes de correlação, o que indica a semelhança dos dois padrões de salpicos. Finalmente, o deslocamento será extraído pela posição do pico.

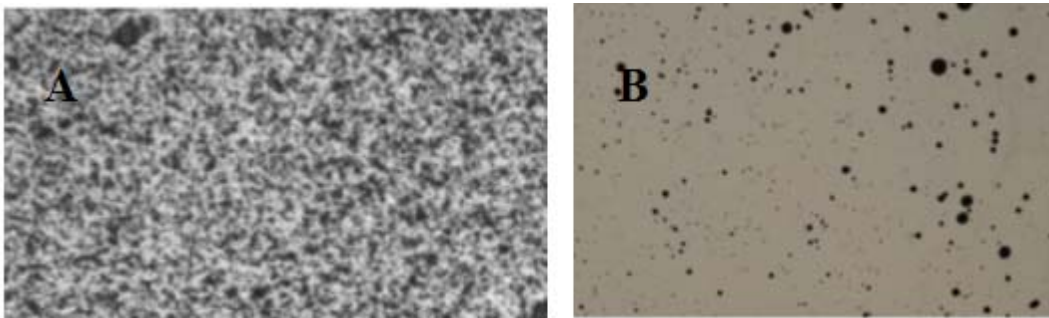
A Correlação de imagem digital (CID) é uma técnica de medição não-destrutiva e sem contato para medir a deformação superficial de um objeto submetido a forças, comparando imagens tiradas em diferentes condições de carregamento. Uma imagem da área segmentada é dividida em pequenas subáreas. Uma imagem subsequente, em seguida, analisada comparando as pequenas subáreas e seguindo suas novas posições. É então possível medir a deformação completa do campo de uma área.

O CID é uma metrologia óptica projetada para medir a deformação superficial. É também um método de análise de imagem de campo completo, que é usado para

avaliar as propriedades mecânicas de uma amostra, medindo diretamente o deslocamento. Ao correlacionar uma série de imagens tomadas antes, durante e após o carregamento, o deslocamento da amostra é medido. (YUAN, 2014).

O método CID também é conhecido como o Método de Correlação Mancha Digital (DSCM). É um método de medição óptica não-interferométrica. O "Mancha" implica que esta técnica é baseada na difração (Lagattu, Bridier, Villechaise, & Brillaud, 2006) da superfície, que é semelhante ao método da mancha do laser. Em vez de uma fonte de luz coerente, o DSCM usa fontes de luz sem interferência. A luz branca é a fonte de luz mais utilizada no DSCM. Por esse motivo, também é chamado de método de correlação de mancha digital de luz branca. Uma vez que uma fonte de luz branca não pode causar manchas devido a interferências, devem ser criados manchas virtuais. O DSCM usa texturas ópticas da superfície (por exemplo, figura 19 (A)) ou a superfície pode ser pulverizada com manchas (por exemplo, figura 19 (B)). A DSCM mede o deslocamento de um sólido comparando as mudanças de intensidade cinza do sólido (Pan, Qian, Xie, & Asundi, 2009) antes e depois da deformação.

Figura 19 – Padrão de mancha, (A) Padrão de mancha natural sobre a superfície de concreto, (B) Mancha pintada na superfície do aço.



Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

Na década de 1960, Burch e Tokarski (1968, citado por YUAN, 2014) descobriram os fenômenos de que uma série de manchas aparece quando um objeto é iluminado por uma fonte de luz coerente, como um laser. Mais tarde, aplicou-se esta técnica em medidas metrológicas. O método mancha laser é amplamente utilizado em medidas de deformação. Como um método de interferência, no entanto, o método da mancha do laser possui algumas limitações: o método da mancha do laser requer um ambiente de teste de alta estabilidade (sem

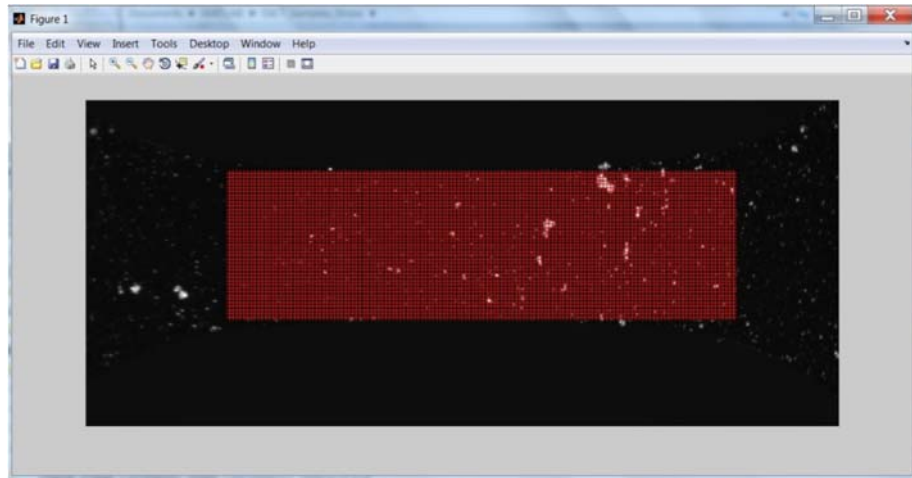
vibração) e tem um alto custo. Chiang e Asundi (1979, citado por YUAN et al., 2014) desenvolveram uma nova técnica que usa luz branca em vez de um laser. Isso é chamado de método de luz branca. Após muitos anos de experimentação e investigação, o método CID tornou-se bem desenvolvido. A CID tem muitas aplicações, incluindo a medição do deslocamento (Asundi, 1998), velocidade, previsão de falha e análise de fadiga. A tensão levantada é uma das aplicações mais úteis desta tecnologia, pois atinge alta precisão (5×10^{-6}) para uma ampla gama de materiais. O processo de medição do CID pode ser dividido em três etapas:

1. Configuração experimental (incluindo preparação de corpos de prova);
2. Aquisição de dados;
3. Análise computacional;

A análise de dados também pode ser separada nas seguintes etapas (Lagattu, et al. 2004):

- O primeiro passo é localizar a região de interesse (RDI) na imagem;
- Seguida da sobreposição de uma grade fixa como uma imagem de referência, como mostrado na figura 20;
- A localização do RDI pode ser extraída da grade;
- A mudança de localização do RDI após o carregamento é rastreada pela correlação de imagem usando o reconhecimento de padrões;
- O RDI correspondente é compatível com a imagem de referência, sobrepondo as imagens posteriores na imagem de referência. O deslocamento é calculado medindo a mudança de localização do RDI.

Figura 20 – Grade em uma imagem de referência.



Fonte: EBERL (2010).

As imagens digitais empregadas no método CID podem ser gravadas por vários dispositivos de aquisição de imagens digitais com diferentes resoluções e precisão. De macro a micro escala, de medição de campo completo a áreas específicas, o método CID pode realizar várias escalas de medição usando uma variedade de dispositivos ópticos. Os dispositivos incluem:

- Câmera de dispositivo acoplado a carga (CCD);
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Microscopia atômica de força (MAF);
- Dispositivo de varredura de tomografia computadorizada (TC).

Para Fayyad (2014), uma das principais vantagens de usar a técnica de processamento de imagens para analisar o processo de fissuração do concreto é a possibilidade de obter uma reconstrução completa da geometria da fenda sem quaisquer medidas complicadas.

Segundo Saldaña (2015), na mecânica dos materiais, é importante conhecer a relação tensão-deformação de cada material, a fim de compreender seu comportamento em diferentes cargas. O concreto é um dos materiais mais utilizados e estão sempre carregados mecanicamente.

Hang (2016) diz que a correlação de imagem digital (CID) é um método fotogramétrico que permite a reconstrução de campos de deslocamento e de deformação de imagens de superfície. Os deslocamentos e tensões são

reconstruídos por seções de correlação (subconjuntos) de referência e imagens deformadas.

CID é uma técnica avançada de medição de campo completo experimental, que foi proposta pela primeira vez em mecânica sólida nos anos 80 por Peters e Ranson. O interesse pela pesquisa decorre da sua capacidade potencial de fornecer medição de deformação sem contato. Isso é benéfico em situações em que os sensores de deformação não podem ser facilmente colocados e mantidos, ou onde é necessária a reconstrução completa de campos de deformação. O princípio básico do CID consiste em combinar padrões de salpicos em imagens de nível de cinza de uma amostra em alguma configuração de referência e vários estados deformados, assumindo a convecção da distribuição do nível de cinza durante a transformação. Bornert (2017).

Tradicionalmente, o CID é aplicado a imagens em escala de cinza tomadas com câmeras monocromáticas, mas com o advento de câmeras digitais amplamente disponíveis, existe o potencial de explorar cor em CID. À medida que as imagens em cores contêm mais informações, prevê-se que o mesmo tamanho do subconjunto possa produzir melhores resultados para CID de cores em comparação com CID tradicional em escala de cinza. Este estudo examina vários tamanhos de manchas em padrões de salpicos e diferentes tipos de deformação e seu efeito no desempenho de CID de cores e CID de escala de cinza. Hang (2016).

De acordo com Jeon (2015), a aquisição de imagens de alta resolução é amplamente utilizada em várias aplicações de processamento de imagens, incluindo a criação de conteúdo, a vigilância de vídeo inteligente, a radiografia, a bioengenharia, a imagem médica, etc. Como os sensores de imagem de alta resolução aumentam o ruído de produção e sensação, a super-resolução ou imagem de alta resolução, é uma maneira alternativa de aumentar a resolução espacial sem usar um sensor de imagem de maior densidade.

Os padrões e deformações de manchas foram simulados e as imagens foram geradas numericamente. Os erros são calculados pela obtenção da diferença entre os valores de deslocamento ou de deformação simulados e reais introduzidos. Os resultados obtidos sugerem que, geralmente, Color CID fornece melhores resultados em comparação com CID de escala de cinza. A quantidade de melhoria no desempenho da Color CID depende do tamanho das manchas na imagem e tipo de deformação. Geralmente, a melhoria é maior para pequenos tamanhos de

subconjuntos e diminui com o aumento do tamanho do subconjunto. Também se descobriu que, para cenários de deformação complexos, o desempenho do CID em escala de cinza é melhor do que a CID colorida se o subconjunto selecionado for maior do que um tamanho de subconjunto específico, geralmente conhecido como "tamanho de subconjunto ótimo".

Ao longo da última década, houve um rápido desenvolvimento das técnicas de processamento de imagens, bem como em câmeras digitais de alta resolução. Pan et al. (2009) consideraram que o método CID é atualmente uma das tecnologias de medição óptica mais promissoras com amplas perspectivas de aplicação. Novos avanços neste campo podem fornecer ferramentas para medir e fornecer informações sobre o processo de fratura do concreto. Além disso, as medidas CID podem permitir que os pesquisadores identifiquem as abordagens mais promissoras da mecânica da fratura para o modelo de concreto e concreto armado. O uso da CID em engenharia estrutural aumentou ao longo das duas últimas décadas, Wattrisse et al. (2001) e Fayyad (2014).

Os diagramas de tensão-deformação são muito importantes para entender o comportamento dos materiais submetidos a carga, eles mostram a parte elástica, plástica e ruptura dos materiais. Existem dois métodos para obter o diagrama: os métodos invasivos em que a mecânica se aproveita fazendo testes físicos como o tubo de teste no qual é colocada uma pequena peça da sonda e é aplicada uma carga específica, então é medida a deformação em deslocamento.

Os métodos ópticos são usados como uma maneira invasiva de determinar o estresse residual, os deslocamentos no campo e a tensão, em que a técnica mais utilizada é o método de perfuração de furos, criado em 1930 por Mathar, atualmente esta técnica é padronizada pela ASTM. Quando uma luz laser é sentida em uma superfície fosca, como papel ou material semelhante a uma borracha, é formado um padrão de mancha e um padrão granuloso de alto contraste será refletido. Este efeito foi chamado de granularidade por Rigden e Gordon.

O procedimento de correspondência de imagem mais simples é a correlação cruzada (CC) que pode ser realizada no espaço físico no espaço de Fourier usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT), pode-se avaliar a função CC muito rapidamente, aproveitando-se a alta velocidade do algoritmo FFT fazendo reconhecimento de padrões estatísticos multiespectral e multi-temporâneo digital. Kuglin e Hines observaram que a informação sobre o deslocamento de uma imagem

em relação a outra está incluída no componente de fase do espectro de poder cruzado das imagens. A técnica de correlação foi aplicada analisando a evolução da deformação de um material semelhante a uma borracha com tensões multiaxiais; também para medições de tensão usando um sistema CID 2D para obter o diagrama de deformação de um material composto e também é aplicado no teste de tração de aquecimento.

O concreto é um dos materiais mais utilizados na mecânica estrutural. Em 1988, Rots e Borst carregaram um pedaço de concreto em teste de tensão e obtiveram cerca de 3 N/mm² e 0,02% de tensão-deformação respectivamente, este material foi utilizado para o desenvolvimento de técnicas de modelagem da resposta sísmica; Wasantha encontrou uma relação entre tensão-deformação para concreto sob carga pesada de veículos.

O desenvolvimento de métodos de teste não destrutivos é o principal desafio para a avaliação de elementos estruturais nas construções existentes. Em usinas hidroelétricas com problemas de RAA, onde as tensões do gel expansivo podem dar uma indicação de alerta precoce de problemas de degradação estrutural, precisando de uma avaliação mais aprofundada. Os medidores de tensão são os dispositivos físicos para fazer a mesma tarefa, mas difíceis de manter nesse tipo de ambiente e apenas medem a tensão em um ponto específico em uma direção específica. CID seria capaz de fornecer um método sem contato e campo completo para medição de deformação. (HANG, 2016).

Os métodos experimentais comumente utilizados no campo de medição de deformação e deslocamento são divididos em duas categorias: métodos de medição óptica (de não contato) e métodos de medição mecânica (de contato).

A capacidade de monitorar deformações e conseqüentemente encontrar as tensões em materiais durante seu funcionamento pode, em última instância, fornecer uma melhor estimativa da vida útil da estrutura e ajudar na prognose de danos. Outras propriedades como rigidez poderiam ser obtidas, sendo então comparadas com vários modelos matemáticos, por exemplo no estudo da mecânica da fratura e modelo de elementos finitos para determinar se a estrutura está se comportando como previsto.

Prognose de dano e monitoramento da dinâmica estrutural tem sido o foco de muitos estudos e tem resultado em muitas abordagens para ambos os campos. As maiorias das abordagens se dividem em duas categorias: medidas estáticas e

medidas dinâmicas. Nas medidas estáticas buscam-se reunir informações sobre a mudança da forma (interna e externa) e deformação de uma estrutura ao longo do tempo. Uma anomalia nas medições (por exemplo, uma concentração de tensão repentina) pode indicar danos. Medidas dinâmicas podem ser feitas para armazenar a resposta da estrutura para uma mesma força aplicada em um dado período de tempo. Cada uma dessas abordagens depende da velocidade, deslocamento, aceleração e/ou tensão podendo ser de medições de contato e não contato.

Extensômetros, acelerômetros, LVDTs são os sensores mais comuns empregados na engenharia e comumente encontrados nesses laboratórios. Sensores esses que baseiam qualquer nova técnica experimental a ser validada.

Os sensores embarcados ópticos, extensômetros e transdutores piezelétricos são capazes de medir estruturas continuamente, as medidas são realizadas pontualmente, existindo algumas desvantagens na sua utilização como o custo da inserção dos mesmos na estrutura a ser monitorada, durante o processo de fabricação, a possibilidade de degradação ou falha do sensor devido às intempéries, o aumento de massa total da estrutura.

A maior desvantagem destes tipos de sensores é que somente uma seção da estrutura sobre investigação pode ser examinada. Isto faz com que os métodos de medição sejam trabalhosos e consumam muito tempo quando se deseja analisar vários pontos, especialmente em grandes estruturas.

Utilizar uma técnica de medição de não contato e de campo completo (*full-field*) tem levado pesquisadores a desenvolver diferentes métodos de medição óptica. As vantagens destes métodos são a ausência de sensores acoplados à estrutura impedindo o sistema de medição de afetar o comportamento da estrutura e ainda fornecer a medida de vários pontos da estrutura simultaneamente.

Várias técnicas utilizando sensores de não contato têm sido utilizadas para medir deslocamento e deformação em uma variedade de situações. A CID usa muitos dos princípios de fotogrametria, que é uma técnica usada para obter dados geométricos a partir de uma fotografia ou série de fotografias. Se a relação entre as dimensões do objeto fotografado e as dimensões guardadas no sensor é conhecida, uma escala pode ser criada para converter as dimensões nas fotos em dimensões reais.

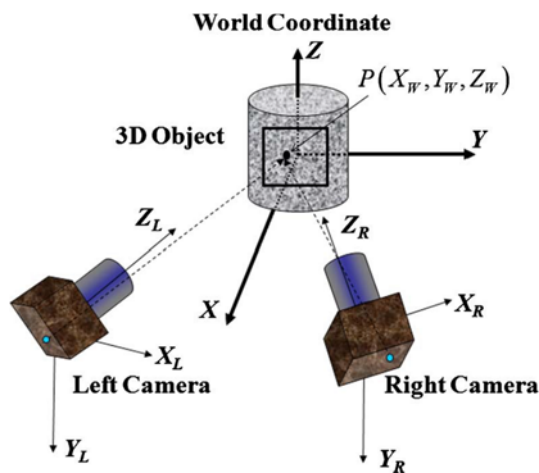
4.5.1 2D-CID

Com base nas dimensões de medição da amostra, o CID pode ser dividido em duas categorias gerais:

- 2D CID bidimensional (2D) é usado para obter medição de deformação no plano;
- 3D CID tridimensional, a medição de deformação fora do plano, ao invés de rastrear o movimento do ponto no plano, 3D CID rastreia o movimento de um volume unitário dentro da amostra. (Pan, 2009).

O método 2D CID usa um único dispositivo de aquisição de imagem digital para rastrear a deformação. O método 3D requer dois dispositivos de aquisição de imagens digitais calibrados. Este sistema de duas câmeras é chamado de sistema de visão estéreo e pode fornecer valiosas informações tridimensionais sobre o objeto. O diagrama esquemático do 3D-CID é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Esquema do sistema 3D-CID

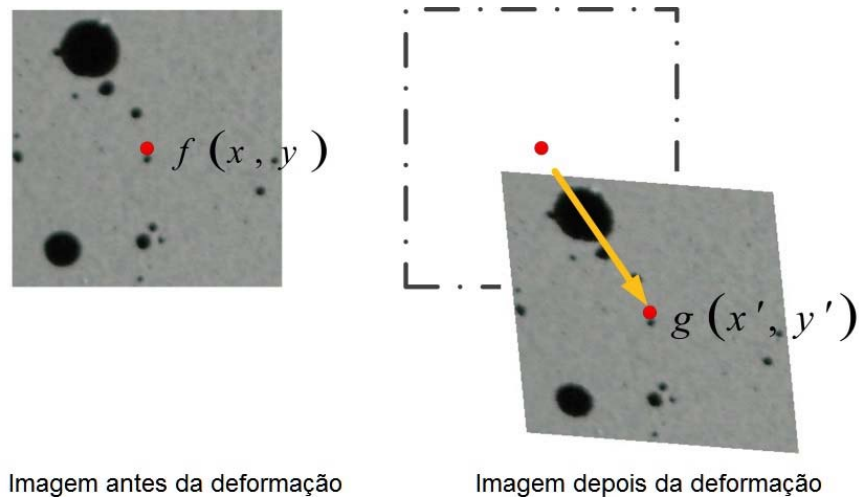


Fonte: Hu, Xie, Lu, Hua, e Zhu (2010) e Yuan (2014)

O princípio do CID 2D é rastrear o movimento de pontos específicos entre uma imagem de referência e imagens deformadas como mostrado na figura 22. Para calcular o deslocamento da região de interesse, RDI, é gerada uma grade para localizar a posição. Após o carregamento, a mudança na localização do RDI é rastreada por correlação de imagem usando uma técnica de correspondência de padrões. No padrão, um subconjunto com o pixel no centro é usado para a

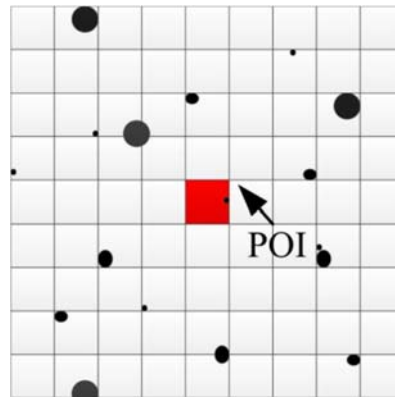
correlação. O subconjunto é um quadrado de pixels $N \times N$. Um esquema de um subconjunto é mostrado na figura 23. Normalmente, os tamanhos dos subconjuntos variam de 7×7 a 21×21 pixels. É desejável usar esses subconjuntos por combinação em vez de pixels individuais porque cada subconjunto contém uma variação mais ampla nos níveis de cinza que podem ser identificados de forma exclusiva (Pan, 2009). Para encontrar a semelhança entre o subconjunto de referência e o subconjunto deformado, os critérios de correlação estão envolvidos. A correlação é baseada em combinar cada pixel dentro de uma área e calcular a disparidade, como mostra a figura 23. Os critérios de correlação são os algoritmos para alcançar isso. O procedimento maximiza o coeficiente de correlação, que é determinado pela avaliação da matriz de intensidade de pixel das duas imagens.

Figura 22 - Correlação do deslocamento de pixels por CID.



Fonte: Adaptado de Pan (2009).

Figura 23 - Esquema de um subconjunto de 9×9 pixels.



Fonte: Yuan (2014).

Para uma pequena tensão, a deformação da amostra pode estar dentro do subconjunto ou no nível de precisão do subpíxel. Assim, antes que os subconjuntos de duas imagens estejam correlacionados, as posições de pixels com intensidades que se enquadram no subconjunto devem ser definidas. O esquema de interpolação, que fornece precisão de subpixel, deve ser utilizado.

No material homogêneo, uma interpolação de ordem inferior (zero ou primeira ordem) (por exemplo, interpolação bilinear) é suficiente para aproximar a variação de deslocamento. Para um material não homogêneo, são necessários esquemas de interpolação de ordem superior (por exemplo, interpolação bicúbica). Os esquemas de interpolação de ordem superior envolvem mais termos e proporcionam maior precisão de registro e melhor caráter de convergência. (YUAN, 2014).

Na medição de deslocamentos em 2D CID deve-se saber que a correlação é conseguida usando um subconjunto de um tamanho predeterminado em torno do pixel de interesse na imagem de referência e correspondente imagem deformada. A precisão do nível de subpixel é alcançada por algoritmos de registro de subpixel e critérios de correlação robustos.

Embora o princípio da CID seja direto, existem dois desafios principais em aplicações práticas: precisão e eficiência computacional, que geralmente são contraditórias. Maior precisão requer tempo computacional mais longo usando a mesma configuração do computador. (YUAN, 2014).

O princípio da correlação da imagem para a medição da deformação é mapear um deslocamento local. No método CID, os deslocamentos são apresentados em termos de pixels. Para um subconjunto quadrado contendo n pixels, f_i e g_i são

definidos como a intensidade cinza da imagem de referência e a imagem deformada do pixel, respectivamente. Vários critérios de correlação foram propostos e utilizados na medição do deslocamento, incluindo a:

- Correlação cruzada (CC);
- Soma da diferença absoluta (SAD);
- Soma da diferença quadrática (SSD);
- Soma paramétrica da diferença quadrática (PSSD);
- Soma das distâncias Hamming (SHD);
- Correlação de mínimos quadrados (LSC).

Para diminuir o erro causado pela mudança de intensidade dos subconjuntos, os critérios acima são modificados para:

- O critério de correlação cruzada média zero (ZNCC);
- A soma normalizada média zero do critério da diferença quadrada (ZNSSD);
- A soma paramétrica do quadrado critério de diferença (PSSDab) com dois parâmetros adicionais.

De acordo com Tong (2005) e Pan et al. (2010), se a intensidade de um pixel permanecer inalterada nas imagens durante a deformação, usando diferentes critérios de correlação não afetam o resultado da medição do deslocamento. No entanto, em testes reais, esta condição raramente é satisfeita. Para evitar erros significativos nas medidas de deslocamento causadas por uma falta de correspondência do modelo (SCHREIER, et al. 2000), de mudança de intensidade, um critério de correlação adequado deve ser selecionado para lidar com as variações de intensidade.

1) Critério de correlação cruzada (CC)

Os critérios CC podem ser divididos em quatro tipos, de acordo com a precisão de possíveis mudanças de intensidade:

- CC direto;
- Correlação cruzada média zero (ZCC);
- Correlação cruzada normalizada (NCC);
- Correlação cruzada normalizada média zero (ZNCC).

O princípio de todos os critérios CC é maximizar os coeficientes de correlação cruzada. O coeficiente de CC direto é mostrado na equação 1.

$$C_{CC} = \sum f_i g_i \quad (1)$$

O coeficiente de correlação cruzada média zero (ZCC) envolve a subtração do valor médio da intensidade do subconjunto na equação 2.

$$C_{ZCC} = \sum [(f_i - \bar{f}) \times (g_i - \bar{g})] \quad (2)$$

Onde $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$ é o valor médio de intensidade do subconjunto de referência,

$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$ o valor médio de intensidade do subconjunto deformado.

Ao subtrair o valor médio da intensidade do subconjunto, o critério ZCC reflete a tolerância da mudança de deslocamento do subconjunto entre a imagem deformada e a imagem de referência. ZCC reduz a sensibilidade do método CID à mudança de deslocamento do subconjunto. O coeficiente de correlação cruzada normalizada (NCC) usa o soma da raiz da intensidade do subconjunto, como mostrado na equação 3.

$$C_{NCC} = \frac{\sum f_i g_i}{\sqrt{\sum f_i^2 \sum g_i^2}} \quad (3)$$

O NCC reduz o efeito da iluminação diferente em duas imagens, dividindo-se pela altura da raiz-soma da intensidade do subconjunto. (WATMAN, 2004).

O coeficiente de correlação cruzada normalizada de média zero (ZNCC) combina as vantagens de ZCC e NCC como definido pela equação 4.

$$C_{ZNCC} = \frac{\sum \bar{f}_i \bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2 \sum \bar{g}_i^2}} \quad (4)$$

Onde $\bar{f}_i = f_i - \bar{f}$ e $\bar{g}_i = g_i - \bar{g}$.

Ao combinar as vantagens de ZCC e NCC, o critério ZNCC é o critério mais robusto e confiável para o processamento de imagens. A combinação minimiza a influência da mudança de intensidade (Tong, 2005; Pan, 2009).

2) Critério da Soma da diferença absoluta (SAD)

O SAD é calculado subtraindo pixels dentro de uma vizinhança quadrada entre a imagem de referência e a imagem deformada. É usado frequentemente para estimar o movimento por meio da detecção de referência. Um marco é uma característica visual que é relativamente única dentro de uma imagem e é estável ao longo do tempo (Watman, Austin, Barnes, Overett e Thompson, 2004).

Ao contrário de NCC e ZNCC, os critérios de correlação SAD podem identificar áreas dentro da mesma imagem que exibem diferenças locais. A correlação é conseguida minimizando o coeficiente de SAD. As equações 5 e 6 dão os coeficientes de correlação para SAD direto e ZNCC, respectivamente

Critério SAD direto:

$$C_{SAD} = \sum |f_i - g_i| \quad (5)$$

Soma zero-zero das diferenças absolutas:

$$C_{ZSAD} = \sum |(f_i - \bar{f}_i) - (g_i - \bar{g}_i)| \quad (6)$$

3) Soma dos critérios de diferença quadrada (SSD)

Os coeficientes CC estão intimamente relacionados aos coeficientes. A maximização do coeficiente de critérios CC é equivalente à minimização do coeficiente de critério SSD. A soma dos critérios de diferença quadrada pode ser

dividida em quatro tipos, pois os critérios de correlação cruzada também foram divididos.(YUAN, 2014).

Critério SSD direto:

$$C_{SSD} = \sum (f_i - g_i)^2 \quad (7)$$

Soma zero-zero do critério de diferença quadrada (ZSSD), que corresponde a ZCC,

$$C_{ZSSD} = \sum [(f_i - \bar{f}_i) \times (g_i - \bar{g}_i)]^2 \quad (8)$$

Soma normalizada de critério de diferença quadrada (NSSD), que corresponde a NCC,

$$C_{NSSD} = \sum \left(\frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2 \quad (9)$$

Soma normalizada zero de critério de diferença quadrada (ZNSSD), que corresponde a ZNCC

$$C_{ZNSSD} = \sum \left(\frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right)^2 \quad (10)$$

4) Correlação de mínimos quadrados (LSC)

A correlação de mínimos quadrados é usada na correspondência de imagens. A equação básica para o coeficiente de correlação baseia-se em uma modelagem estatística por estimativa de mínimos quadrados, como mostrado na Equação 11.

$$C = \frac{\sum [f_i - g_i]^2}{\sum f_i^2} \quad (11)$$

Para amostras de micro escala, pode-se utilizar das ferramentas de algoritmos de registro de subpixel, ou seja, o deslocamento pode estar dentro de vários pixels, portanto, a localização deve ser determinada no nível de subpixel usando um dos dois métodos disponíveis:

- Um é o método direto, que usa um modelo apropriado para representar a localização do pixel, como modelos gaussianos ou de interpolação. Este método afeta diretamente o desempenho do algoritmo de correlação.
- O segundo método envolve a aplicação de um algoritmo de otimização para determinar os deslocamentos precisos.

Alguns algoritmos de registro de subpixel amplamente utilizados são apresentados a seguir:

1) Algoritmo de Newton-Raphson

O algoritmo de Newton-Raphson (NR) é o algoritmo de registro de subpixel mais utilizado, pois possui uma precisão de medição relativamente alta e eficiência computacional.

O algoritmo NR leva em consideração a deformação de um subconjunto entre a referência e a imagem deformada. Um ponto de subconjunto assumido (x, y) na imagem de referência é mapeado na imagem deformada como (x', y') usando a equação 12 e 13.

$$x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (12)$$

$$y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (13)$$

Onde u e v são componentes de deslocamento para os centros de subconjuntos nas direções x e y , respectivamente, Δx e Δy são as distâncias do centro do subconjunto para o ponto (x, y) .

A equação 13 emprega a função de forma de primeira ordem. Para algumas aplicações, o algoritmo NR envolve derivadas de segunda ordem da função de correlação, o que aumenta a complexidade computacional. Aumentar a ordem do algoritmo aumenta consideravelmente o tempo de computação necessário. Assim, a

menos que seja necessária uma precisão de registro de subpixel especial, é apropriado usar uma função de forma linear no algoritmo NR. (YUAN, 2014).

O algoritmo NR é um algoritmo de otimização numérica não-linear que requer um acerto inicial preciso da localização. Pan e Li (2011, citado por YUAN et al., 2014) melhoraram o algoritmo NR eliminando efetivamente os cálculos repetitivos e redundantes necessários para o algoritmo NR convencional. Eles propuseram uma estratégia de varredura de deslocamento orientada por confiabilidade para obter uma estimativa inicial confiável e precisa. Uma tabela de consulta de coeficiente de interpolação global pré-calculada é fornecida para evitar os cálculos de interpolação repetitiva em locais de subpíxels.

2) Método baseado em gradiente

O método baseado em gradientes foi desenvolvido pela primeira vez como método de fluxo óptico por Davis e Freeman (Davis & Freeman, 1998, citado por YUAN et al., 2014). O pressuposto fundamental do método baseado em gradiente é que a intensidade do nível de cinza de um ponto em uma imagem de referência é a mesma na imagem deformada. Suponha que $f(x, y)$ e $g(x', y')$ são a intensidade do nível de cinza de um ponto em uma imagem de referência e uma imagem deformada, respectivamente. Então,

$$f(x, y) = g(x', y') \quad (14)$$

Onde $x' = x + u + \Delta x$, $y' = y + v + \Delta y$.

u e v são componentes de deslocamento para os centros de subconjuntos nas direções x e y , respectivamente. Δx e Δy são as distâncias do centro do subconjunto para o ponto (x, y) .

Usando uma expansão de Taylor de $g(x', y')$ para determinar derivadas em termos de u , v , Δx e Δy , o sistema pode ser resolvido usando o método de mínimos quadrados.

Zhou e Goodson (2001, citado por YUAN et al., 2014) aplicaram um método iterativo baseado em gradiente espacial para reduzir a complexidade computacional desse método. Bing Pan et al. (2009, citado por YUAN et al., 2014) modificaram o

método iterativo baseado em gradiente espacial proposto por Zhou e Goodson, introduzindo um modelo linear de mudança de intensidade. Isso pode reduzir a sensibilidade da mudança de iluminação e intensidade cinza.

3) Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (GA) é um método de otimização inspirado na evolução natural: o princípio darwiniano de sobrevivência e reprodução dos animais. Ele é usado pelo método 2D-CID para otimizar o critério de correlação em determinar os parâmetros de deformação.

O GA foi explorado pela primeira vez pela Holanda na década de 1960. É muito diferente dos algoritmos clássicos de otimização e pode ser facilmente aplicado a uma variedade de campos. GA cria uma população inicial de indivíduos aleatórios e, em seguida, aplica crossover e mutação para gerar novos indivíduos. Os indivíduos são escolhidos por alguns critérios de qualidade para encontrar o mais apto, o que é conhecido como uma seleção. Assim, a nova geração tem indivíduos melhores. O processo é repetido até que os critérios de parada sejam satisfeitos. O melhor indivíduo na última geração é a solução ideal.

Para o 2D-CID, um mapa de vetor de deformação inicial é gerado aleatoriamente dentro de um possível intervalo. O critério de correlação funciona como um critério de qualidade. Quando a convergência é atendida, o vetor de deformação é considerado encontrado.

4) Outros algoritmos

Com o desenvolvimento da matemática moderna, novas teorias matemáticas e métodos de reconhecimento foram desenvolvidos e aplicados ao método CID para alcançar a precisão do subpixel.

As redes neurais artificiais (ANNs) são introduzidas para estimar os deslocamentos de subpixel para a correlação de imagem digital. O algoritmo foi aplicado a dispositivos microeletrônicos estressados termicamente. Pan et al. (2009, citado por YUAN et al., 2014) investigaram o algoritmo iterativo dos mínimos quadrados (ILS) e o algoritmo dos mínimos quadrados pontual (PLS) para calcular o deslocamento e a tensão, respectivamente. O objetivo desses novos algoritmos era

aumentar a eficiência computacional sem sacrificar a precisão da medida do subpíxel.

4.5.2 Erro no CID

A precisão do CID é afetada por duas principais fontes de erro: experimental e numérico. Erros experimentais resultam de dispositivos experimentais, ambiente de teste e parâmetros de configuração de teste. Os dispositivos experimentais típicos 2D CID consistem em um dispositivo de aquisição de imagem digital, uma fonte de iluminação e um dispositivo de carregamento.

O ruído do dispositivo óptico está diretamente relacionado à qualidade da imagem digital, o que pode influenciar a precisão da correlação. A intensidade da luz está relacionada aos níveis de cinza da amostra, que influencia na precisão da correlação.

Uma vez que a sobreposição e a subexposição diminuem a precisão, é necessária uma iluminação estável e adequada para minimizar o erro associado à iluminação. Jerabek (2010, citado por YUAN et al., 2014) descobriram que a intensidade da iluminação logo abaixo da superexposição pode fornecer o melhor resultado. A superexposição perderá o detalhe na informação das partes mais brilhantes de uma imagem. O ambiente do teste contribui para erros nas medidas de deslocamento. Os erros ambientais são principalmente devidos a vibrações causadas pela operação dos dispositivos de carregamento induzindo o ruído nos dispositivos ópticos e desintonizam o tempo entre a fotografia e a posição RDI.

Os erros numéricos incluem o tamanho do subconjunto (também conhecido como sub-janela), o padrão da mancha da amostra e o algoritmo de correlação.

O método CID divide a imagem em pequenas sub-janelas de N pixels ou $N \times N$ pixels. O centro de cada caixa de janela é considerado como um "ponto" para correlacionar. O tamanho do subconjunto é definido por pixels. Ao discretizar a imagem em subconjuntos, a correlação de imagens pode ser realizada. A seleção do tamanho do subconjunto é muito importante no método CID, pois afeta a precisão significativamente.

O tamanho do subconjunto depende do padrão de manchas da amostra. Os tamanhos de subconjuntos muito grandes e muito pequenos induzem imprecisões.

Enquanto os subconjuntos maiores diminuem os erros, eles também suavizam o deslocamento real localizado, aumentando o tempo de computação.

Os subconjuntos menores simplificam a computação, mas podem não conter características suficientes para obter medidas de deslocamento confiáveis, aumentando os erros. Para otimizar o tamanho do subconjunto, muitos estudos foram realizados. Sun e Pang (2007, citado por YUAN et al., 2014) introduziu o conceito de entropia de subconjuntos para quantificar a qualidade do padrão de imagem do subconjunto. Eles também provaram os efeitos do tamanho do subconjunto em áreas de deslocamento homogêneas e não homogêneas. Para o deslocamento homogêneo, o tamanho do subconjunto tem um limite inferior para diminuir erros aleatórios.

Subconjunto com tamanho abaixo do limite inferior pode induzir erros significativos. Da mesma forma, o deslocamento não homogêneo, o tamanho do subconjunto tem um limite superior devido ao aumento dos erros sistemáticos. Bing Pan et al. (2008, citado por YUAN et al., 2014) desenvolveu o conceito de entropia de subconjuntos utilizando a Soma de Quadrado de Subconjunto de Gradientes de Intensidade (SSSIG) como suporte matemático.

Como mencionado anteriormente, o método CID usa manchas "artificiais". Se a textura natural da superfície da amostra tiver uma distribuição de intensidade cinzenta aleatória, a CID usa a textura natural como padrão de manchas. Se a textura natural da superfície da amostra não tiver uma distribuição de intensidade cinzenta aleatória, as manchas devem ser pintadas com spray na superfície. Nesse caso, o CID usa a tinta pulverizada como padrão de manchas.

A qualidade do padrão de mancha tem um efeito significativo na precisão da medida do deslocamento. Lecompte (2006, citado por YUAN et al., 2014) estudou a influência do tamanho médio da mancha e do tamanho do subconjunto sobre a precisão do CID. O tamanho médio da mancha foi determinado por um método de morfologia da imagem. Bing Pan et al. (2010, citado por YUAN et al., 2014) introduziu um parâmetro chamado gradiente de intensidade média, que é outra avaliação de qualidade dos padrões de manchas.

O gradiente de intensidade média dos padrões de mancha está intimamente conectado a erros sistemáticos (erro de polarização média) e erros aleatórios (desvio padrão) da medida de deslocamento. Os gradientes de intensidade média maiores corresponderam a um menor desvio médio e erros de desvio padrão.

4.6 Métodos de medição e análise de deformação óptica

Os métodos de medição da deformação óptica utilizam um dispositivo óptico para determinar a tensão. O dispositivo óptico pode ser um microscópio, laser ou câmera.

O CID também é conhecido como método de medição de deformação óptica e comumente chamada de velocimetria de imagem de partículas (PIV) e é uma tecnologia óptica sem contato que rastreia o movimento de alvos escolhidos. Uma câmera é usada para capturar uma série de imagens digitais que são analisadas em relação a um estado inicial não deformado.

As imagens gravadas durante a experimentação ou o monitoramento são processadas após a conclusão da experiência. As imagens são processadas digitalmente com a ajuda de um computador usando análise de intensidade cinza na região de interesse. Os resultados da análise determinam o deslocamento e a tensão.

A técnica de imagem digital é aplicável a uma ampla gama de escala, de tão grande quanto alguns metros a tão pequenos quanto nanômetros. As amostras podem ser carregadas em condições quase estáticas ou dinâmicas. Câmeras com altas frequência capturam muitas imagens por segundo, e estão prontamente disponíveis. Os avanços nas câmeras digitais de alta resolução e o aumento do desempenho da computação melhoraram a precisão da técnica CID. Como resultado, a CID encontrou extensas aplicações em laboratório e na indústria. (YUAN, 2014).

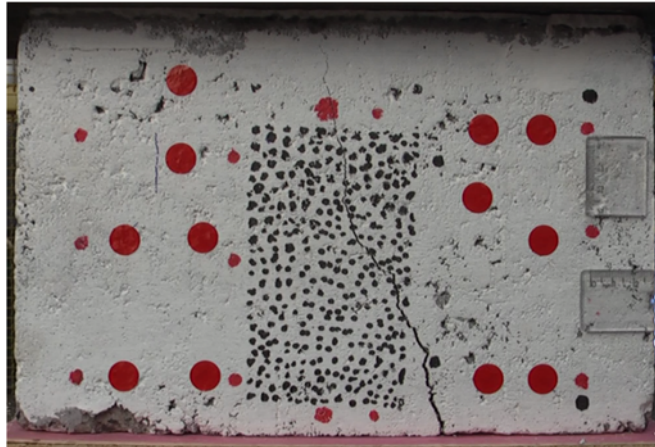
Neste estudo, dois tipos de padrões são usados para medição de deformação: mancha aleatória e retângulo pintado. CID usa manchas pintadas como padrão. Ao rastrear a posição dos salpicos, pode-se determinar o deslocamento da amostra. Yuan (2014) desenvolveu uma nova abordagem chamada de detecção de borda de um retângulo pintado na superfície. Ao medir a posição das bordas dos retângulos, o deslocamento pode ser encontrado. Dois programas de computador são usados para diferentes níveis de precisão: ImageJ™ (National Institutes of Health, 2017) é usado para nível de pixel e Matlab para análise em nível de subpixel.

No nível de subpixel, são aplicados dois algoritmos: ajuste gaussiano (SHANG; CHEN; TIAN, 2010) e interpolação spline (HOU, 1978; LUU et al., 2011, citado por YUAN, 2014).

4.6.1 Método da correlação digital da mancha (DSCM)

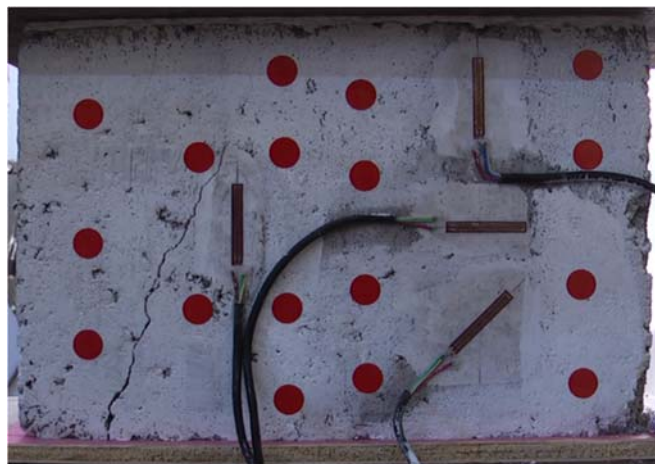
As manchas são amplamente utilizados como um padrão no método CID, que também é chamado de método de correlação digital da mancha (DSCM). A mancha pode ser um padrão natural na amostra ou pode ser pintado. As manchas devem ser distribuídas aleatoriamente sobre a superfície, como mostrado nas figuras 24, 25 e 26.

Figura 24 – Padrão DSCM em corpo de prova 1.



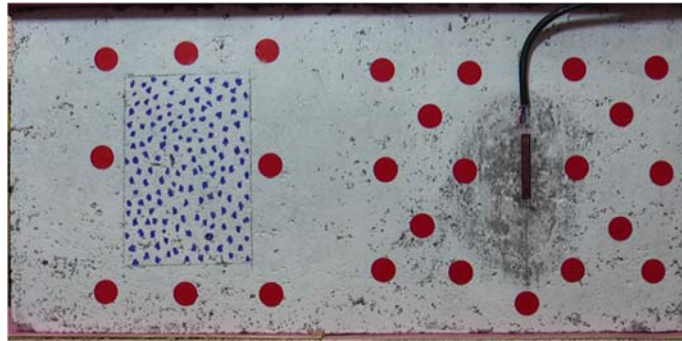
Fonte: Própria.

Figura 25 – Padrão DSCM em corpo de prova 2.



Fonte: Própria.

Figura 26 – Padrão DSCM em corpo de prova 3.



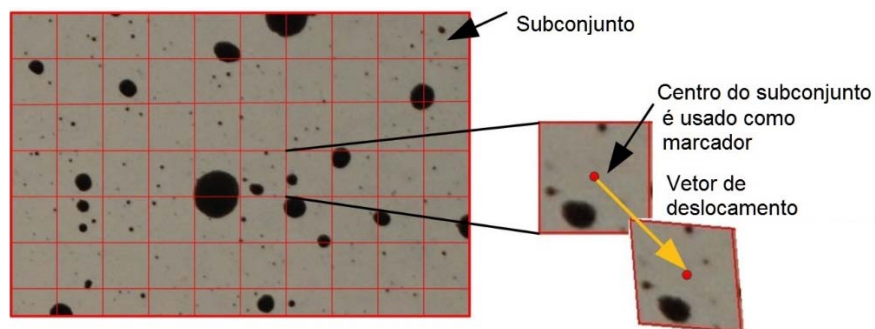
Fonte: Própria.

O processo de medição de deformação por DSCM é o seguinte: primeiro, uma imagem da amostra não deformada é tomada como uma imagem de referência e é dividida em vários subconjuntos.

Cada subconjunto deve ter uma distribuição de intensidade de cinza única, que funciona como um marcador para identificar cada subconjunto à medida que a deformação ocorre. Então, uma série de imagens são tomadas sob carregamento, à medida que a amostra se deforma. Essas imagens serão comparadas com a imagem de referência assim que a experiência for concluída. Um critério de correlação é aplicado para localizar os subconjuntos de destino.

O critério procura a máxima semelhança entre o subconjunto de imagens deformado e de referência. O deslocamento, como vetor, é medido a partir do centro de um subconjunto de referência para o centro do subconjunto deformado. Um mapa de deslocamento de campo completo é obtido determinando o deslocamento que cada subconjunto experimental, como um vetor. Um diagrama do método CID do teste é mostrado na figura 2727.

Figura 27 - Subconjunto do vetor de deslocamento para o método CID.

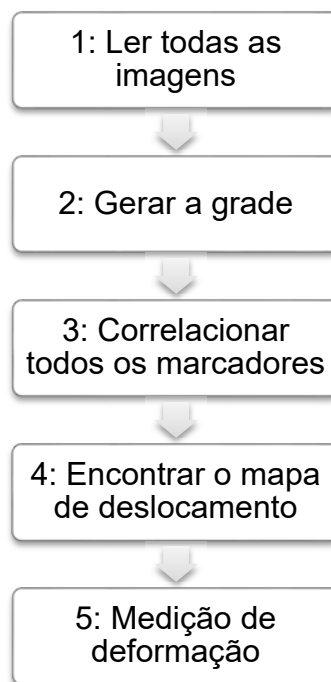


Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

Esta capacidade de produzir um mapa de medição de deformação de campo completo é uma das maiores vantagens da DSCM. Antes do desenvolvimento desta técnica, era muito difícil relacionar a informação local com características globais, como a estirpe de superfície completa. (YUAN, 2014).

O pós-processamento de imagens foi concluído usando a correlação e o Rastreamento de Imagem Digital, que é um código baseado em Matlab. O processo deste algoritmo é mostrado na figura 28.

Figura 28 - Fluxograma da correlação e rastreamento de imagens digitais.



Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

- **Etapa 1:** Ler todas as imagens. A imagem de referência é a primeira imagem, que é usada como linha de base para todas as medidas de deslocamento;
- **Etapa 2:** Gere a grade. Esta etapa pede ao usuário selecionar uma região de interesse (ROI) dentro da imagem de referência, que é então dividida em vários subconjuntos. O centro de cada subconjunto serve como um marcador para a correlação da imagem. O usuário seleciona o número desejado de subconjuntos. Mais subconjuntos fornecem mais marcadores para a correlação, que pode fornecer informações mais detalhadas sobre a superfície da amostra e diminuir o ruído nas medições. No entanto, um

número muito grande de subconjuntos requer tempos de processamento muito mais longos e possui maiores requisitos de configuração do computador.

- **Etapa 3:** Correlacionar todos os marcadores. Este é o passo principal para o CID. Uma função incorporada de Matlab chamada "cpcorr.m" é usada para rastrear a localização dos marcadores usando o critério de correlação cruzada, conforme mostrado na equação 15. A resolução da posição do marcador é tão alta como 1/1000 pixels, que é nível de subpixel. "cpcorr.m" só pode rastrear a posição dos marcadores em até quatro pixels, tornando-o adequado para pequenos deslocamentos. Para deslocamentos maiores, é necessário um coeficiente de fator de redução para usar esta função. O tamanho da imagem é primeiro reduzido para cair na faixa requerida pelo código e, em seguida, o resultado da medição é ampliado para a imagem original. As posições dos marcadores nas imagens deformadas são gravadas.

$$C_{cc} = \sum f_i g_i \quad (15)$$

Onde f_i é a intensidade cinzenta dos pixels na imagem de referência, g_i é a intensidade cinzenta dos pixels na imagem deformada.

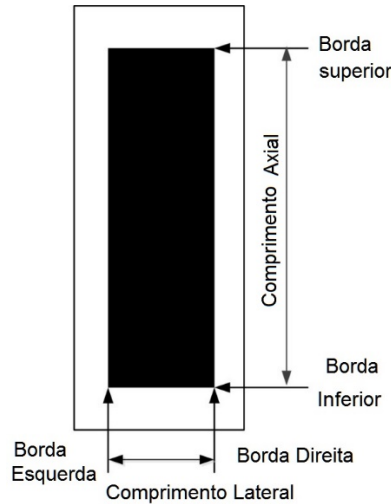
- **Etapa 4:** Encontre o mapa de deslocamento. Ao comparar as posições de marcadores nas imagens de referência e de destino, o mapa de deslocamento é obtido.
- **Etapa 5:** Medição da deformação. A partir do mapa de deslocamento, o mapa de estirpe de campo completo é determinado por um método de mínimos quadrados.

4.6.2 Método de detecção de borda retangular e os níveis de pixel e subpixel

O método de detecção de borda de retângulo calcula a tensão ao localizar as bordas de um retângulo pintado, calculando a mudança de tamanho. A deformação do CP causa alterações nas dimensões do retângulo. Ao detectar essas mudanças, a tensão pode ser determinada. O comprimento é definido pela distância entre duas bordas paralelas do retângulo, como entre as bordas esquerda e direita ou as bordas superior e inferior.

Portanto, a medição da deformação torna-se um problema de detecção de borda. Um diagrama esquemático do retângulo é mostrado na figura 29.

Figura 29 – Diagrama esquemático do retângulo.



Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

O entendimento do nível de pixel e subpixel são facilitados pelas etapas e procedimentos descritos a seguir, deve-se saber que a borda do retângulo em uma imagem digital deve ser definida. A borda é determinada por uma intensa mudança de intensidade em uma pequena distância (vários pixels) na imagem.

A amostra utilizada foi um retângulo preto foi pintado em uma superfície branca. Portanto, a borda pode ser facilmente definida como o limite entre o pixel preto e o pixel branco. No entanto, nas imagens reais, devido às condições de iluminação e às características inerentes das câmeras do dispositivo de carga acoplada (CCD), a maioria dos pixels não é simplesmente preto ou branco.

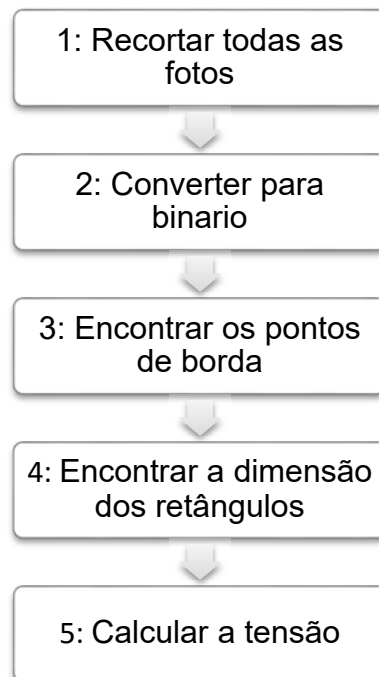
Em vez disso, eles são uma sombra de cinza. Criar uma imagem binária é uma opção para resolver este problema, uma vez que, em binário, os pixels são pretos ou brancos. Para criar imagens binárias, deve ser selecionado um limiar que marcará o limite entre os tons de cinza que são binarizados para preto e branco. Então, a tensão pode ser calculada usando a equação 16.

$$\varepsilon_i = \frac{\text{Mudança de comprimento em pixels}}{\text{comprimento em pixels}} = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (16)$$

Onde l_i é o comprimento do retângulo na imagem i , e l_0 é o comprimento do retângulo na imagem de referência.

Os materiais de alta elasticidade experimentam grandes mudanças nos pixels durante a deformação, tornando suficiente a detecção de borda de nível de pixel. ImageJ™ é um software usado para medição de comprimento de retângulo a nível de pixels. O fluxograma do programa de macro ImageJ™ é mostrado na figura 3030.

Figura 30 - Fluxograma do método ImageJ™.

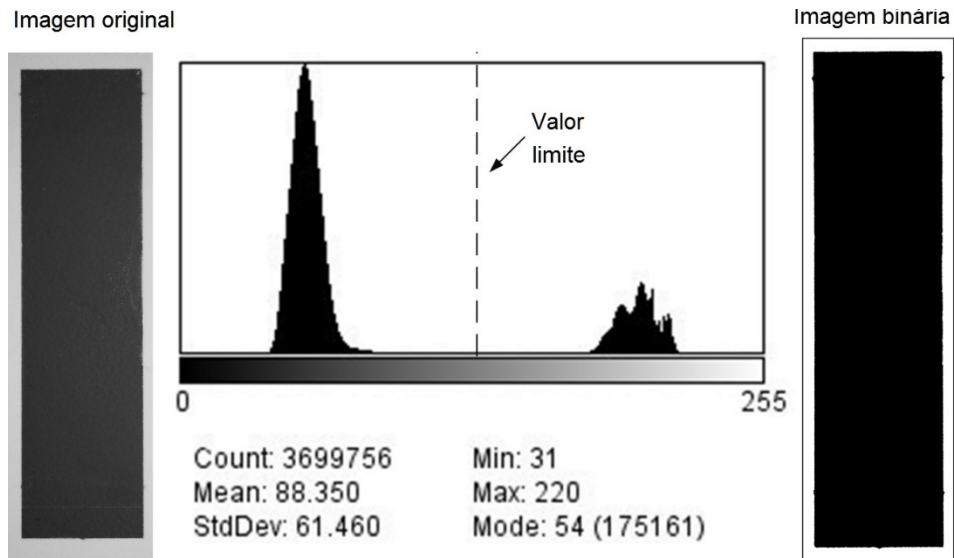


Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

- **Etapa 1:** Recortar todas as fotos para que apenas o retângulo preto e o fundo branco sejam visíveis. Ao remover as partes complicadas do plano de fundo, o processamento torna-se mais simples.
- **Etapa 2:** Alterar as fotos RGB para fotos de escala de cinza de 8 bits e, em seguida, limite as fotos para produzir imagens binárias. O valor de limiar para cada série de fotos é o mesmo, uma vez que essas fotos têm as mesmas condições de iluminação, em teoria. As condições de iluminação são mantidas consistentes durante os testes para garantir que as fotos mostrem um brilho semelhante. O princípio de selecionar um valor de limiar é tal que a imagem binária deve ter uma vantagem clara sem incluir muito ruído fora do retângulo. Uma vez que as fotos recortadas

apenas contêm um objeto (o retângulo) e um fundo, o limite é selecionado na média dos meios de distribuição de todos os pixels discretos, como mostrado na figura 31.

Figura 31 - Limite da foto por ImageJ™.



Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

- **Etapa 3:** Encontrar os pontos de borda. Verifique as cores de pixels, preto ou branco, de cada imagem linha por linha. Se os pixels adjacentes mudarem, grave esta localização como uma vantagem.
- **Etapa 4:** As dimensões do retângulo são obtidas para cada linha e coluna detectando as quatro arestas. A altura do retângulo é medida a partir das bordas superior e inferior e a largura das margens esquerda e direita. Essas dimensões são tomadas como o valor médio do comprimento de cada linha ou coluna.
- **Etapa 5:** A tensão é então calculada usando a mudança de comprimento em pixels.

Quanto á compreensão do nível de subpixel deve-se antes saber que os materiais com rigidez diferente experimentam diferentes deformações sob a mesma carga. Para materiais mais dúcteis, a mudança de comprimento na imagem pode ser de vários pixels. Para materiais quebradiços, a mudança de comprimento pode ser

inferior a um pixel. A medição de deformação de subpixel é necessária para medir pequenas deformações.

A análise do subpixel supera algumas das limitações da análise de nível de pixel e fornece informações mais detalhadas. Os subpixels só podem ser aproximados com probabilidade, pois sua determinação requer suposições. Essas suposições devem basear-se em valores de pixels existentes. Os algoritmos de detecção de borda de subpixel podem ser classificados em três categorias: métodos de montagem, métodos de interpolação e métodos baseados em momentos, sendo que o método baseado no momento não é discutido, pois é um método estatístico.

A borda em uma imagem é definida como o local onde ocorrem mudanças de intensidade cinza acentuada. No entanto, devido à qualidade e ao ruído da imagem, a maior alteração na intensidade cinza na borda é difícil de detectar. Em vez de usar a intensidade cinza dos pixels, o gradiente (alteração no nível de cinza) é frequentemente escolhido para detectar bordas.

Ao usar o gradiente, a borda é definida como a localização onde ocorre o maior gradiente. Como os valores de pixel são discretos, os gradientes são calculados subtraindo intensidades cinza de pixels adjacentes. O gradiente é um vetor, com valor e orientação. Para as bordas esquerda e direita, o gradiente (G_x) é obtido subtraindo a coluna anterior. O comprimento do retângulo lateral é a posição da borda direita menos a posição da borda esquerda. Para as bordas superior e inferior, o gradiente (G_y) é obtido subtraindo a linha anterior, com o comprimento do retângulo axial da posição da borda inferior menos a posição da borda superior.

4.6.3 Montagem gaussiana e interpolação spline

Os métodos de montagem tentam construir funções contínuas para simular o gradiente de borda ajustando curvas a pontos de borda reais. O uso de uma função gaussiana para ajustar a curva de inclinação da borda de uma imagem é chamado de ajuste gaussiano.

Para o retângulo, a tensão é medida em duas direções: axialmente e lateralmente. Para cada direção, negligenciando a rotação e cisalhamento, a deformação pode ser simplesmente calculada por $\Delta L / L_0$.

Portanto, uma função gaussiana 1D (equação 17) é usada para representar gradientes de pixels ao redor da borda na direção do gradiente.

$$y = ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (17)$$

Onde x é a localização do pixel, y é a intensidade do gradiente do pixel, μ é a média da função gaussiana, σ é o desvio padrão da função gaussiana, a é a altura do pico da curva gaussiana. A média, μ , de uma função gaussiana é o local onde a função atinge seu valor mais alto. Também é considerado a localização da borda do subpixel. O desvio padrão, σ , é a largura da função.

Um programa Matlab gaussiano apropriado foi criado por YUAN (2014) para calcular medições de comprimento de nível de subpixel. O processo é descrito como na figura 32. Neste processo, as seguintes abreviaturas são utilizadas:

Subscrito l : esquerda

Subscrito r : direito

Subtítulo t : topo

Subscrito b : parte inferior

Subscrito m : medido

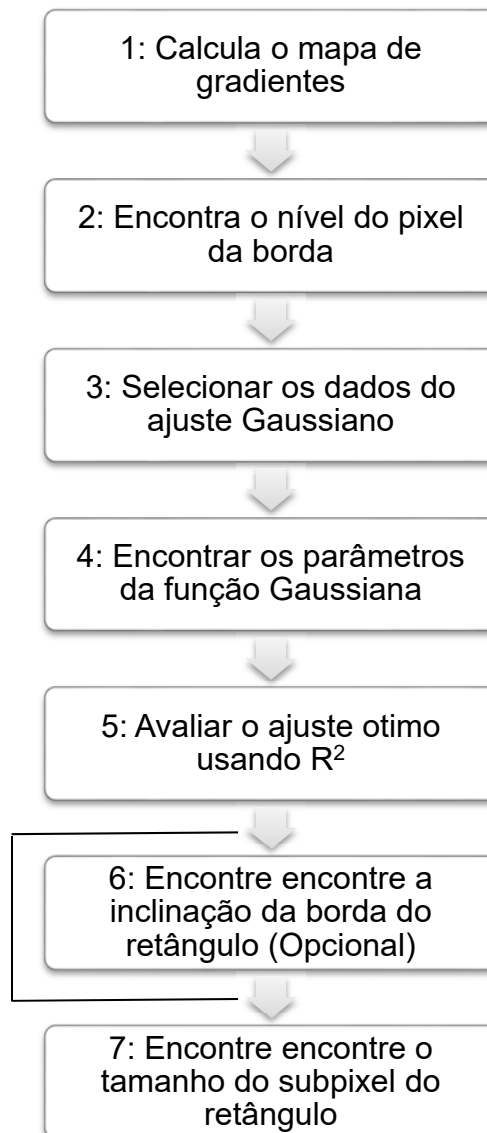
i : número de imagem (0,1, 2, 3, ...), 0 para a imagem de referência (primeira imagem)

l : o comprimento do retângulo

μ : a média da função gaussiana

σ : o desvio padrão da função gaussiana

Figura 32 - Diagrama de fluxo do método de ajuste gaussiano.



Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

- **Etapa 1:** Calcular o mapa de gradiente de cada imagem com base na intensidade cinza. Para o comprimento axial, o valor do gradiente é encontrado subtraindo o valor do pixel da linha anterior da linha atual. Para o comprimento lateral, o valor do gradiente é encontrado subtraindo o valor do pixel da coluna anterior da coluna atual.
- **Etapa 2:** Encontrar a borda de nível de pixel. A localização do maior gradiente é a borda do nível do pixel.
- **Etapa 3:** Selecionar os dados para o ajuste gaussiano. Selecione oito pixels adjacentes ao redor da borda do nível de pixels, com quatro pixels

em cada lado. Estes oito pixels mais o pixel com maior gradiente dão um total de nove pixels usados para o ajuste gaussiano.

- **Etapa 4:** Encontrar os parâmetros da função gaussiana. Use a localização (x) e a intensidade do gradiente (y) desses nove pixels para ajustar a equação gaussiana 17. O método dos mínimos quadrados é usado para encontrar os parâmetros gaussianos (μ e σ), onde μ é a localização da borda do subpixel e a condição de convergência é 10^{-6} para variações na função gaussiana.
- **Etapa 5:** Avaliar o ajuste ótimo usando o R^2 . Para avaliar o ajuste ótimo da função gaussiana, o coeficiente de determinação (R^2) é considerado.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - y_{\text{estimado}})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad (18)$$

Onde y é o valor observado, y_{estimado} é o valor predicado, \bar{y} é a média do valor observado. Se R^2 for um pequeno número, a curva gaussiana não é considerada adequada para a distribuição da intensidade do pixel da borda, o que significa que o modelo gaussiano não é confiável.

Valores muito alto de R^2 podem filtrar demasiados dados reduzindo a informação da imagem. $R^2 \geq 0,9$ é selecionado como critério para encontrar um bom ajuste gaussiano. Para determinar o comprimento do retângulo, devem ser instaladas duas curvas gaussianas, uma para cada borda. Se os coeficientes de determinação para ambos os lados forem maiores ou iguais a 0,9, então o comprimento é considerado confiável. A figura 33 mostra as curvas gaussianas para uma linha no retângulo preto.

Figura 33 - Esquema da montagem gaussiana para uma linha.



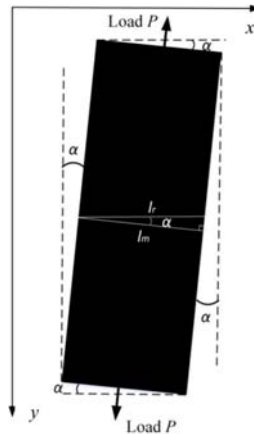
Fonte: Yuan (2014).

- **Etapa 6:** Encontrar a inclinação das bordas do retângulo (opcional). A rotação ocorre se houver algum ângulo entre a amostra e a câmera. A figura 34 mostra um diagrama esquemático da imagem tirada de um espécime girado. O comprimento lateral medido é l_m e o comprimento lateral real é l . l é calibrado pela equação 19. O ângulo de rotação α é o ângulo entre a câmera e a amostra. Este ângulo é calculado usando a inclinação da borda do retângulo. A tensão após a calibração para esta rotação é dada na equação 20.

$$l = l_m \cos \alpha \quad (19)$$

$$\varepsilon_i = \frac{l_{mi} \cos \alpha_i - l_{m0} \cos \alpha_0}{l_{m0} \cos \alpha_0} \quad (20)$$

Figura 34 - Diagrama esquemático da imagem da amostra girada.



Fonte: Yuan (2014).

Em algumas condições, a rotação ocorre durante o teste. Suponha que a primeira imagem seja reta e a amostra gire um ângulo α_i em relação à câmera na imagem i . O comprimento teórico do retângulo na imagem i muda de l_i para l_{mi} . Estas duas medidas estão relacionadas como mostrado na equação 21.

$$l_{mi} = l_i \cos \alpha_i \quad (21)$$

Usando a equação 21 na equação 16 de cálculo de tensão, dá a tensão medida na imagem i , ε_{mi} , que se torna:

$$\varepsilon_{mi} = \frac{l_{mi} - l_0}{l_0} = \frac{l_i \cos \alpha_i - l_0}{l_0} \quad (22)$$

Uma vez que a mudança de comprimento é muito pequena, $l_i \approx l_0$, a diferença entre a tensão real e o valor medido pode ser calculada pela equação 23.

$$\Delta \varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{mi} = \frac{l_i (1 - \cos \alpha_i)}{l_0} \approx 1 - \cos \alpha_i \quad (23)$$

Esta etapa é opcional. Se o erro na medição da deformação causada pela rotação durante o teste for pequeno ($<1^\circ$) e pode ser desconsiderado, este passo não é necessário. Vários erros causados pela rotação são calculados na Tabela 4.

Tabela 4 - Erro na tensão causada pela rotação.

Ângulo α_i (graus)	0,5	1	2	3
Erro $\Delta \varepsilon_i$	$3,8 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-3}$

Fonte: Yuan (2014).

- **Etapa 7:** Encontrar o comprimento de nível de subpixel do retângulo. O comprimento axial é calculado subtraindo a localização superior, μ_t , da localização inferior, μ_b . O comprimento lateral é calculado subtraindo o local esquerdo, μ_l , do local direito, μ_r .

Outro método é a interpolação Spline, um método de análise de imagem subpixel, constrói novos pontos de dados dentro do alcance de dados conhecidos. Isso facilita a aplicação, uma vez que não precisa considerar o ajuste ótimo. Uma interpolação spline é um tipo especial de polinômio por partes. Ele usa polinômios de baixo grau ($n < 4$) para conectar cada ponto de dados conhecido e escolhe o polinômio de seção que pode encaixar perfeitamente todos esses pontos juntos.

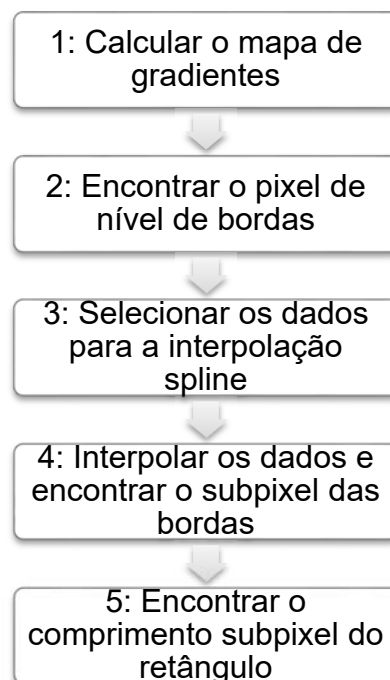
Os métodos de interpolação constroem um conjunto de novos pontos de dados dentro do intervalo de pontos de dados conhecidos. Para uma imagem, é como

inserir muitos pixels entre pixels existentes para aumentar a resolução. Os valores desses pixels são calculados usando a interpolação dos pixels na vizinhança dos pixels de borda da imagem original. Muitos métodos de interpolação foram desenvolvidos (Pang, Tan, & Chen, 2013; Xu, Wang, & Gu, 2013, citado por YUAN, 2014), tais como interpolação linear, bilinear e bicúbica. Uma função de interpolação de *spline* é considerada altamente precisa para a detecção de bordas de subpixel (Hou & Andrews, 1978; Luu, Wang, Vo, Hoang e Ma, 2011, citado por YUAN, 2014). A função de interpolação de spline cúbico é dada na equação 24.

$$y = \sum_{m=0}^3 \alpha_m x^m \quad (24)$$

Onde x é a localização do pixel, y é a intensidade do gradiente do pixel, α é o coeficiente da função spline cúbica. O programa Matlab de interpolação *spline* foi criado para calcular a medição de comprimento de nível de subpixel. O processo está descrito na figura 35.

Figura 35 - Fluxograma do método de interpolação *spline*.



Fonte: Adaptado de Yuan (2014).

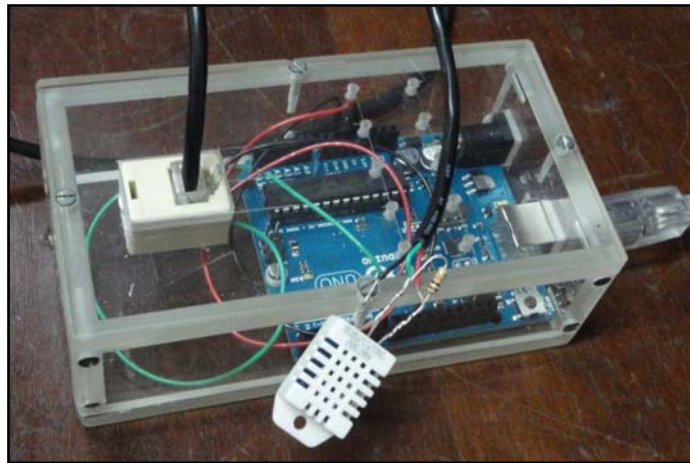
- **Etapa 1:** Calcule o mapa de gradiente de uma imagem usando intensidade cinza. Para o comprimento axial, o valor do gradiente é encontrado pela intensidade cinza de cada linha menos a linha anterior. Para o comprimento lateral, o valor do gradiente é encontrado pela intensidade cinza de cada coluna menos a coluna anterior.
- **Etapa 2:** Encontre a borda de nível de pixel. Encontre o local onde ocorre o maior gradiente, que é a borda do nível do pixel.
- **Etapa 3:** Selecione os dados para a interpolação *spline*: oito pixels adjacentes ao redor da borda do nível de pixel, com quatro pixels adjacentes em cada lado. Os oito pixels mais o pixel com maior gradiente (um total de nove pixels) são selecionados como pontos conhecidos para encontrar uma função *spline* cúbica.
- **Etapa 4:** Interpolação dos pontos conhecidos para encontrar a borda do subpixel. Interpolar usando os pixels conhecidos para criar novos pontos com um tamanho de passo de 0,01 pixels. 0,01 é também a precisão escolhida para esta amostra. Para diferentes requisitos de precisão, um tamanho de passo diferente pode ser escolhido. Encontre a nova localização onde ocorre o gradiente máximo, que é a borda do nível do subpixel, E .
- **Etapa 5:** Encontre o comprimento do subpixel do retângulo. O comprimento axial é calculado como a localização da borda inferior menos a localização da borda superior, $E_b - E_t$. O comprimento lateral é a localização da borda direita menos a localização da borda esquerda, $E_r - E_l$.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Hardware e software

Para este trabalho foi escolhida a automação de baixo custo, onde a plataforma de prototipagem Arduino foi acondicionada em uma caixa de acrílico para evitar possível contato com umidade, o que poderia danificar a placa, foram instalados conectores RJ11 para facilitar conexão dos sensores para fazer as leituras, como mostra a figura 36.

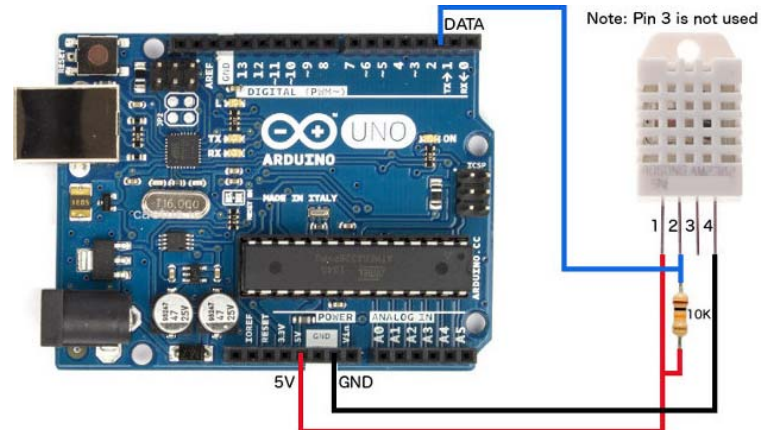
Figura 36 – Hardware Arduino Uno com o sensor DHT 22.



Fonte: Própria.

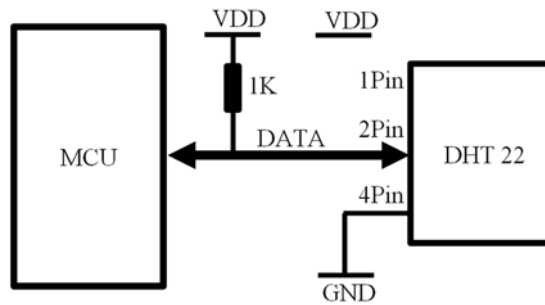
O sensor DHT 22 foi conectado ao Arduino Uno conforme o esquema da figura 37, o diagrama de conexão elétrica do sensor está mostrado na figura 38.

Figura 37 - Esquema de ligação do sensor DHT 22 no hardware Arduino Uno.



Fonte: Cactus (2017).

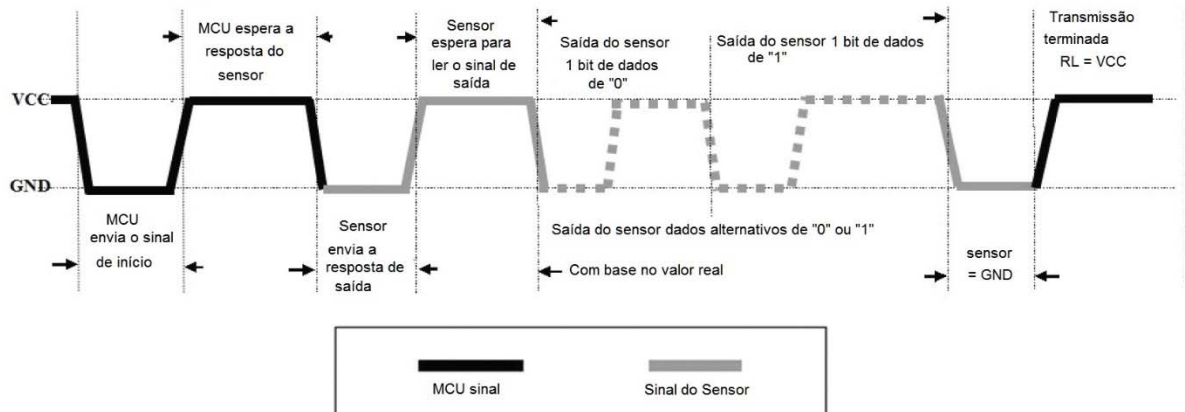
Figura 38 – Diagrama de conexão Elétrica do sensor DHT 22.



Fonte: Adaptado de Sparkfun (2017).

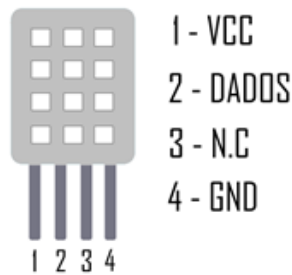
A figura 39 mostra o processo de comunicação geral, o intervalo de todo o processo deve exceder 2 segundos. O esquema de pinagem dos sensores DHT 22 é mostrado na Figura 40.

Figura 39 – Processo de comunicação do sensor DHT 22.



Fonte: Adaptado de Sparkfun (2017).

Figura 40 – Esquema de pinagem do sensor DHT 22.



Fonte: Próprio autor.

Onde:

Pino 1 – VCC (Entre 3V e 5V)

Pino 2 – Saída de dados passando por um resistor de 10 K

Pino 3 – Não conectado

Pino 4 – GND

Para fazer a programação da placa de prototipagem Arduino Uno é necessário fazer o download da biblioteca DHT em: "<https://github.com/adafruit/DHT-sensor-library>" para que o Arduino Uno inicialize o sensor e receba as leituras feitas pelo mesmo.

Depois do download da biblioteca esta deve ser movida para a pasta *libraries* contida na raiz da pasta do IDE Arduino, a figura 41 mostra a IDE do Arduino na versão 1.8.3 carregado com o a Sketch do sensor DHT.

Figura 41 – IDE Arduino versão 1.8.3.



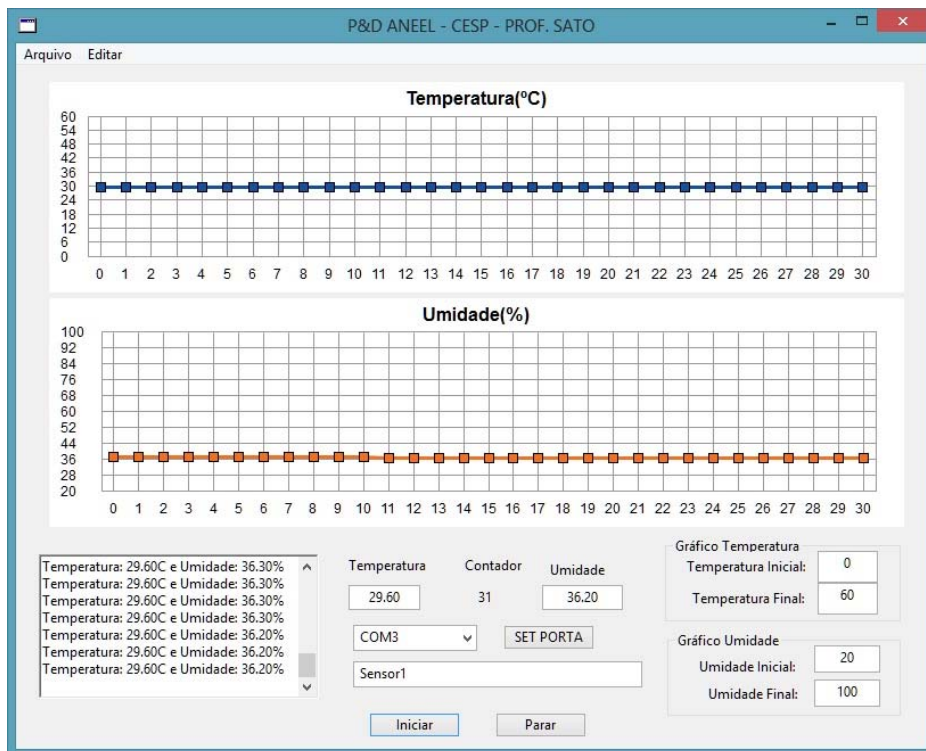
```
// Written by ladyada, public domain
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("DHTxx test!");
  dht.begin();
}
void loop() {
  delay(2000);
  float h = dht.readHumidity();
  float t = dht.readTemperature();
  float f = dht.readTemperature(true);
  if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(f)) {
    Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
    return;
  }
  float hif = dht.computeHeatIndex(f, h);
  float hic = dht.computeHeatIndex(t, h, false);
  Serial.print("Humidity: ");
  Serial.print(h);
  Serial.print(" %\t");
  Serial.print("Temperature: ");
  Serial.print(t);
  Serial.print(" *C ");
  Serial.print(f);
  Serial.print(" *F\t");
  Serial.print("Heat index: ");
  Serial.print(hic);
  Serial.print(" *C ");
  Serial.print(hif);
  Serial.println(" *F");
}
```

Arduino/Genuino Uno em COM1

Fonte: Próprio autor.

Para efetuar a leitura dos dados dos sensores de temperatura e umidade DHT 22 diretamente no computador foi criado um software, como mostra a figura 42, na plataforma Windows™ e com possibilidade de ser compilado para a plataforma Linux™. O software salva em um banco de dados no computador os dados lidos para posterior análise. Foram coletadas informações de temperatura e umidade relativa.

Figura 42 – Software desenvolvido para a leitura em tempo real.



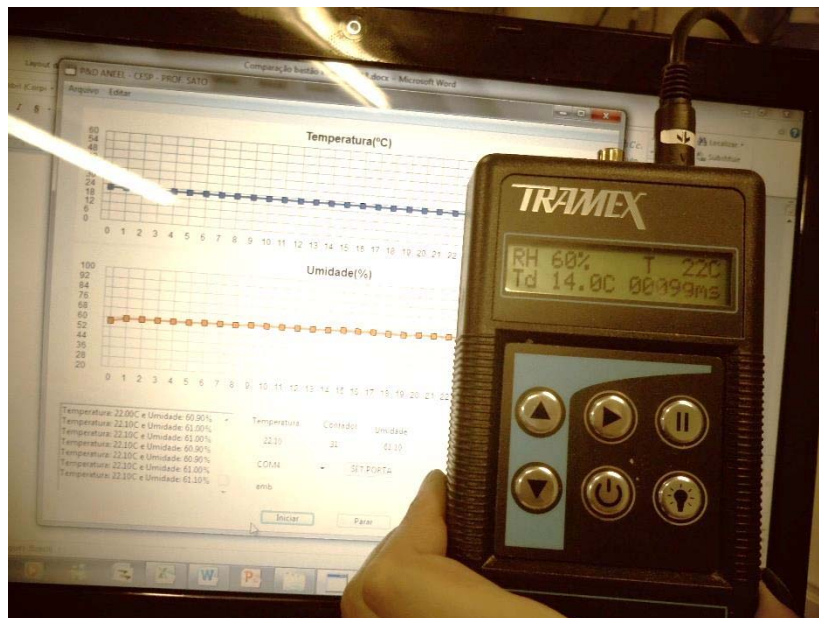
Fonte: Próprio autor.

5.1.1 Sensores utilizados

O monitoramento da UR e a temperatura podem ser aferidos de duas maneiras: por meio de pequenos sensores ou por sondas (sensores do tipo bastão). O monitoramento que se obtém a partir desses sensores é relativo ao ar no orifício do concreto e não intrínseco a ele. Comercialmente foram encontrados vários sensores para o monitoramento da umidade e temperatura, onde se analisou qual o mais viável para cada circunstância.

Foi adquirido um aparelho de medição de umidade e temperatura da Tramex™ com sensor de bastão, devido ao seu uso consagrado em medidas de umidade do concreto, o mesmo foi utilizado apenas para consolidar os valores obtidos pelo sensor DHT 22, visto que para adquirir apenas uma medida nesse aparelho é necessário esperar no mínimo 30 minutos com o sensor inserido no concreto para a estabilização da leitura, foram feitas comparações dos resultados obtidos pelos dois sensores, conforme mostra a figura 43.

Figura 43 - Medidor de umidade e temperatura do tipo bastão para validação dos sensores.



Fonte: Próprio autor.

A comparação foi feita em várias ocasiões, mediu-se a umidade e a temperatura no interior dos orifícios dos corpos de prova (CPs) e no ambiente da sala onde os dados foram coletados. A tabela 5 mostra os valores obtidos durante as comparações.

Tabela 5 - Comparação dos valores obtidos pelos sensores.

Corpos de prova		Ambiente	
Bastão	DHT 22	Bastão	DHT 22
90%	90,9%	57%	57,0%
20°C	20,9°C	21°C	22,0°C
92%	93,9%	60%	61,1%
20°C	20,6°C	22°C	22,1°C
99%	99,9%	58%	60,6%
20°C	20,4°C	22°C	21,6°C

Fonte: Próprio autor.

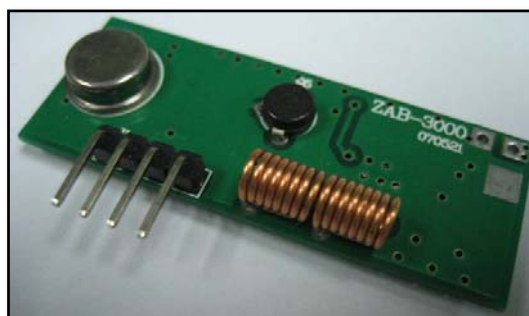
A resolução do medidor de umidade e temperatura da Tramex™ é de 1% na umidade relativa e de 1 °C para a temperatura.

Diante dos valores apresentados pode ser destacado que os dois tipos de sensores apresentam resultados similares, validando então os resultados obtidos pelo sensor (DHT 22) utilizado neste trabalho.

Utilizou-se também um módulo de transmissão sem fio para realizar as leituras obtidas pelos sensores, não havendo a necessidade do operador no local, que muitas vezes é de difícil acesso, nesse caso foi preciso somente de energia para a placa de prototipagem e garantir a estanqueidade do sistema caso fique no intemperismo.

O transmissor testado com resultados de até 3 km em área aberta é o ZAB™ – 3000, como mostrado na figura 44. Na tabela 6 mostra as especificações técnicas do transmissor ZAB™ - 3000.

Figura 44 - Transmissor ZAB™ - 3000 de até 3km de alcance.



Fonte: Adaptado de Alibaba (2017).

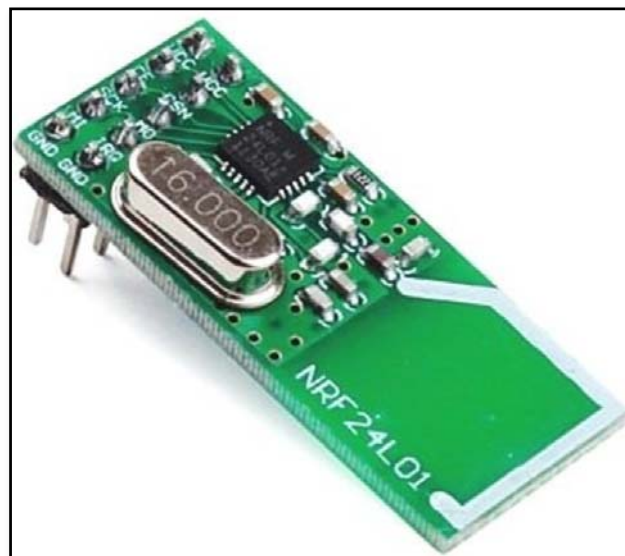
Tabela 6 - Especificações técnicas do transmissor ZAB™ - 3000.

	Especificação	Detalhes
1	Frequência de operação	433MHZ
2	Tensão de funcionamento	DC 9V ~ 12V
3	Modo de modulação	ASK
4	Corrente em operação	200~ 220mA
5	Corrente em repouso	0uA
6	Potência de Transmissão	1,5W
7	Distância de Transmissão	3000 m (espaço aberto)

Fonte: Adaptado de Alibaba (2017).

Utilizou-se também para pequenas distâncias o módulo “*Wireless Transceiver NRF 24L01*” (figura 45) de 2,4 GHz com alcance de no máximo 10 metros, a vantagem desse módulo é a possibilidade de troca de informações entre eles, uma vez que são transmissores e receptores, pode-se também, caso haja atuadores no local manipulá-los com este módulo. As especificações do módulo NRF 24L01 são apresentados na tabela 7.

Figura 45 - Módulo wireless transceiver 2,4 GHz.



Fonte: Flop (2017)

Tabela 7 - Especificações do módulo wireless transceiver NRF 24L01.

Especificações	Detalhes
Tensão de alimentação	1,9 - 3,6v
Corrente de alimentação	1uA
Frequência	2.4Ghz (Antena embutida)
Velocidade de Operação	2Mbps (máx.)
Modulação	GFSK
Regulador de voltagem	Embutido
Comunicação	multi-ponto 125 canais
Dimensões	3,3 x 1,4 x 0,5cm

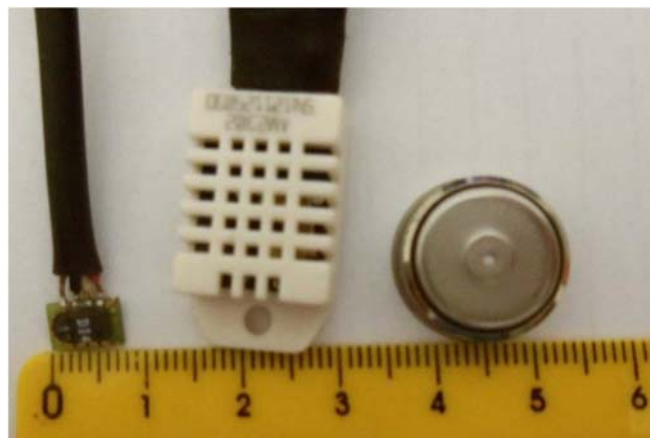
Fonte: Flop (2017)

Visando aumentar a quantidade de dados monitorados na usina, foram estudados sensores de umidade e de temperatura que pudessem compor um sistema de aquisição economicamente viável e aplicável, que necessitasse de pouca manutenção e acesso de dados de maneira remota.

O sensor de umidade e temperatura foi escolhido entre três sensores de fabricantes diferentes com elemento sensetivo do tipo capacitivo, o IButton 1923 da fabricante Maximintegrated™, o sensor SHT 11 da fabricante Sensirio™, o DHT 22 da MaxDetect™.

O comparativo visual das dimensões dos sensores pré-escolhidos é mostrado na figura 46. A decisão foi de acordo com o que apresentou melhor custo/benefício.

Figura 46 - Comparativos das dimensões dos sensores.



Fonte: Albertini (2014).

1) Sensor STH 11

O sensor STH 11 (figura 47) é capaz de medir temperatura e umidade relativa do ar, extremamente compacto, possui elementos sensitivos e de processamento de sinal digital calibrado.

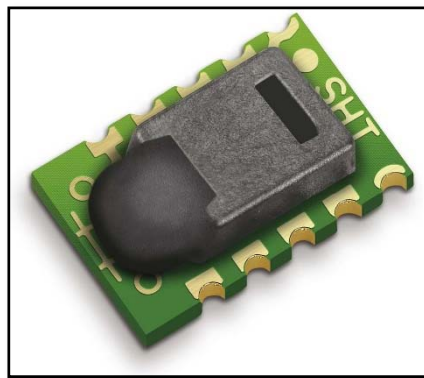
Os sensores são calibrados individualmente em uma câmara de umidade de precisão. Os coeficientes de calibração são gravados na memória interna, resultando é um dispositivo de alta precisão, pequenas dimensões e baixo consumo elétrico.

A comunicação é feita com a interface 2-wires podendo ser implementado na maioria dos microcontroladores. O custo desse sensor foi de U\$ 14,70 por unidade em outubro de 2012.

Como resumo das especificações técnicas do sensor SHT 11, tem-se:

- Tensão: 2,4V a 5,5V
- Consumo em modo *sleep*: 0,3uA a 1,5uA
- Consumo em medição: 0,55mA a 1mA
- Resolução Temperatura: 12/14bits
- Resolução Umidade: 8/12bits

Figura 47 - Sensor SHT 11 da Sensirion™.



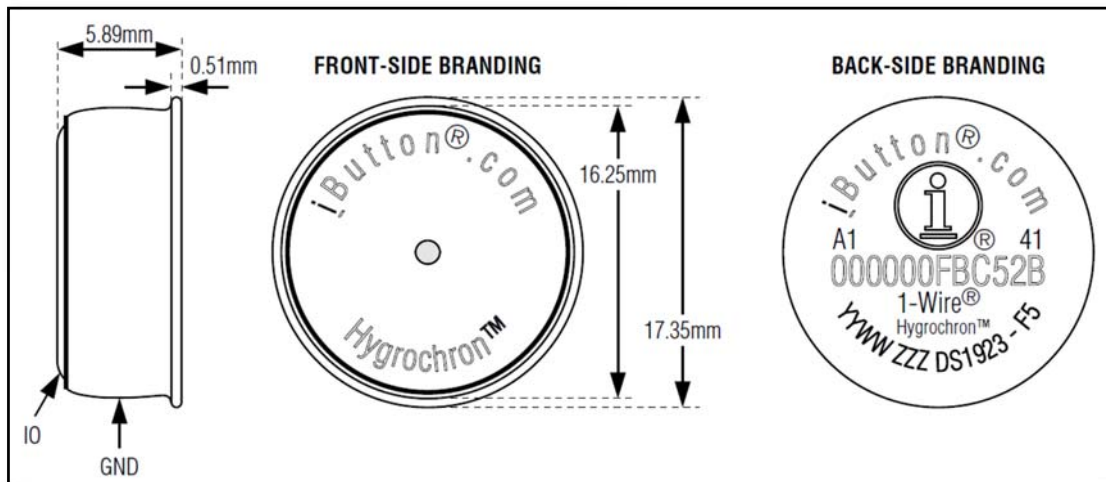
Fonte: Sensirion (2017).

2) Sensor iButton 1923

O Sensor iButton 1923 (figura 48) possui as seguintes características:

- Alta Precisão, auto-suficiente na coleta digital de dados de temperatura e umidade, simplificada transferência de registro de temperatura e umidades;
- Higrômetro digital mede a umidade com 8-Bit (0,6% RH) ou 12-Bit (0,04% RH) de resolução;
- Precisão de temperatura melhor que $\pm 0,5$ ° C de -10°C a + 65°C com correção de Software;
- As medidas de temperatura com 8-Bit (0,5°C) ou 11-Bit (0,0625°C) de resolução;
- Faixa de operação: -20°C a + 85°C; 0 a 100% RH;
- Desperta automaticamente, mede a temperatura e / ou umidade, e armazena valores em 8kb em memória em formato de 8-Bit ou 16-Bit;
- Sensor de umidade em polímero capacitivo;
- Taxa de amostragem de 1s até 273 horas;
- Alarme programável para pontos de máximo e mínimos pré-determinados para temperatura e umidade;
- Início programável de gravação imediatamente após um tempo decorrido ou sobre um ponto de alarme de temperatura;
- 512 bytes de memória geral mais de 64 bytes de memória de calibração;
- A memória permite guardar até 8192 registros;
- Dois níveis proteção de senha de toda a memória e registros de configuração;
- Calibrado individualmente em uma Câmara rastreável;
- Coeficientes de calibração para temperatura e umidade da fábrica programado na memória não-volátil;
- Bateria interna com duração de até 8 anos;

Figura 48 - Sensor Ibutton1923.



Fonte: Maxim Integrated (2013).

Para receber os dados do sensor iButton é necessário um leitor da própria empresa, o leitor adquirido é o DS9490B com interface USB (figura 49).

Figura 49 - Leitor de iButton DS9490B com interface USB.



Fonte: Maxim Integrated (2011).

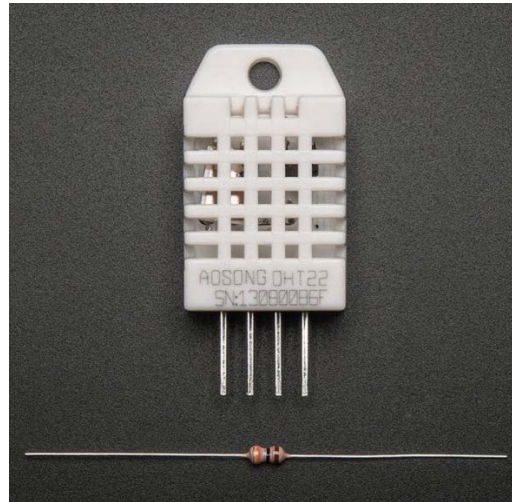
A desvantagem do uso do sensor iButton é que não é possível avaliar as leituras em tempo real, uma vez que é preciso retirá-lo de onde está instalado para descarregar os dados em um computador. Este sensor teve o maior custo dentre os três sensores testados, U\$ 191,30 por unidade em março de 2013.

3) Sensor DHT 22

O Sensor DHT 22 (figura 50), cujas especificações técnicas estão na tabela 8. Possui o menor custo comparado aos outros dois, cerca de U\$ 8,00 por unidade em

março de 2013, o intervalo mínimo de amostragem para os dados de temperatura e umidade são de dois segundos.

Figura 50 - Sensor de temperatura e umidade DHT 22.



Fonte: Adafruit (2017).

Tabela 8 - Especificações técnicas do sensor DHT 22.

Tensão	3.3-6V DC
Sinal de Saída	Sinal digital através de via única
Elemento Sensitivo	Capacitor polimérico
Faixa de operação	Umidade 0-100%RH; Temperatura - -40~80 °C
Precisão	Umidade +-2%RH(Max +-5%RH); temperatura <+-0,5 °C
Resolução ou Sensibilidade	Umidade 0,1%RH; temperatura 0,1 °C
Repetibilidade	Umidade +-1%RH; temperatura +- 0,2 °C
Histerese de Umidade	+ - 0,3%RH
Estabilidade de Longa Duração	+ - 0,5%RH/ano
Período de detecção	Média: 2s
Intercambialidade	Totalmente intercambiável
Dimensões	Pequeno 14 x 18 x 5,5mm; Grande 22 x 28 x 5mm

Fonte: Adaptado de Sparkfun (2017).

5.2 Sistema de monitoramento de umidade e temperatura

Primeiramente escolheu-se o traço do concreto para a moldagem dos corpos de prova com o intuito de avaliar a eficiência dos sensores e verificar o sistema de impermeabilização dos CPs.

Para verificar a umidade e temperatura dos CPs foi utilizado um traço com permeabilidade elevada com profundidades diferentes dos sensores. Foram utilizados CPs prismáticos de 25x25x40 cm, com permeabilidade em torno de $K=10^{-6}$ cm/s, com o intuito de facilitar a passagem de umidade para o interior do concreto.

O antigo Laboratório CESP de Engenharia Civil (LCEC) que no ano de 2017 pertence China Three Gorges (CTG) elaborou um traço com a permeabilidade definida anteriormente, que é apresentado na tabela 9.

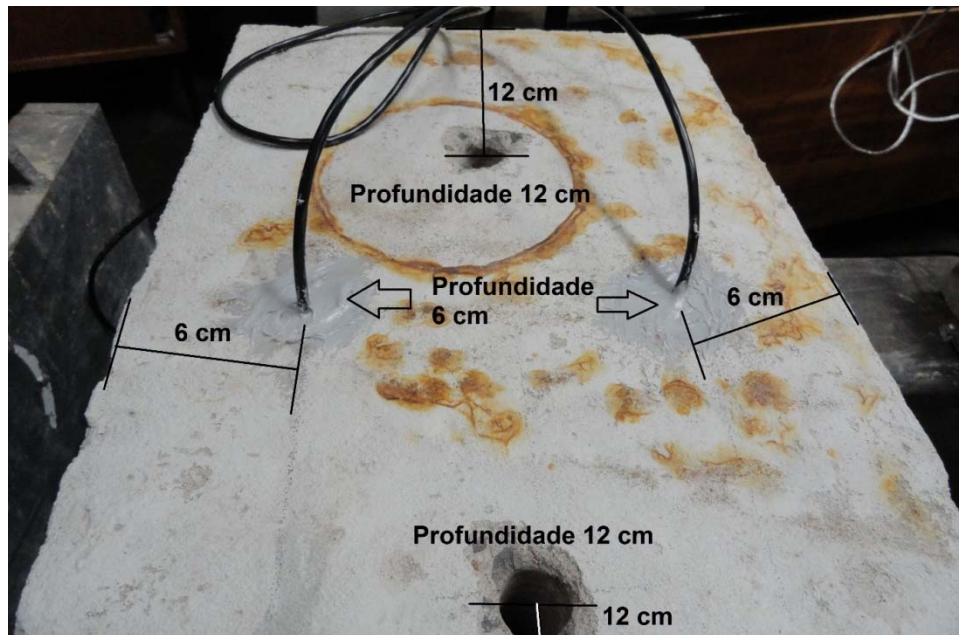
Tabela 9 - Concreto utilizado no ensaio preliminar.

Material	Peso por m³ (kg)
Cimento CP II E 40	250
Areia	828
Brita 1	1237
Água	173
Aditivo Plastificante	1,25

Fonte: LCEC (2013).

Para a colocação dos sensores foram feitos quatro furos com diâmetro de 2,2 centímetros, sendo dois deles com 6 centímetros de profundidade e os outros dois, com 12 centímetros. A disposição dos furos é mostrada na figura 5151, onde a profundidade de cada furo equivale a distância entre o furo correspondente e a borda do CP.

Figura 51 - Preparação dos corpos de prova para leitura.



Fonte: Próprio autor.

Os furos dos CPs foram vedados com silicone para que a umidade externa não interferisse nas leituras dos sensores, reproduzindo a realidade no interior do furo, foi colocado um anteparo entre o sensor e a pasta de silicone para que houvesse a proteção do sensor, contra possíveis excessos de silicone, o que poderia vir a danificar o mesmo, conforme mostra a figura 52.

Figura 52- Inserção e selamento do sensor no furo.



Fonte: Próprio autor.

A UR medida no interior dos furos foi de 99,9%, por esse motivo foram levados os CPs para o exterior do LCEC com o intuito de diminuir a umidade relativa

por aquecimento do concreto. Após 15 dias não houve redução na umidade relativa no interior dos furos. Os CPs foram levados a uma estufa e mantidos a uma temperatura de 50°C pelo período de 15 dias, sendo monitoradas várias vezes. Findado o período a UR nos furos com 6cm de profundidade estavam em torno de 75% e nos furos de 12cm estava acima dos 90%. Nestas circunstâncias focou-se as investigações da UR em furos com 6 cm, porque, com valores maiores o tempo dispendido seria muito grande e com a possibilidade de não alcançar UR menor que 80% no interior dos furos.

Na confecção dos novos CPs foram abertos somente dois furos de 6cm em cada e com isso pode-se reduzir o tamanho dos CPs passando a ser de 12,5x12,5x25 cm, como mostra a figura 5353. Mudou-se também o traço dos CPs com o intuito de facilitar ainda mais a entrada e a saída de umidade pelo concreto, com permeabilidade $K=10^{-4}$ cm/s, também executado pelo LCEC, o traço é mostrado na tabela 10, onde se tem um menor consumo de cimento por m³.

Tabela 10 - Traço do concreto utilizado (ensaio definitivo).

Material	Peso por m³ (kg)
Cimento CP II E 40	200
Areia	686
Brita 1	1396
Água	174
Aditivo Plastificante	1,00

Fonte: LCEC (2013).

Figura 53- Corpos de prova modificados.



Fonte: Próprio autor.

Foram moldados 31 CPs com o traço da tabela 10 e as dimensões citadas anteriormente, os furos foram executados ainda na concretagem com o posicionamento de tubos de PVC durante a moldagem, como mostra a figura 5454.

Figura 54- Corpo de prova moldado com orifícios.



Fonte: Próprio autor.

Depois de curados em câmara úmida os CPs, foram levados à estufa a uma temperatura de 60°C, monitorou-se a UR nos furos com o sistema desenvolvido buscando valor inferior a 78%, esse valor foi atingido após 16 dias na estufa. A UR abaixo de 80% dá uma faixa de trabalhabilidade de 20% até a saturação (100%).

Foram medidas a UR e temperaturas novamente e constatou-se que havia variação nos valores, segundo Albertini (2014) isto provavelmente se deve ao fato de que a circulação de ar dentro da estufa é limitada, secando mais os corpos de prova que estavam próximos à fonte de calor, segundo a figura 55.

Figura 55 - Corpos de prova dentro da estufa.



Fonte: Albertini (2014)

Os CPs foram colocados em uma sala refrigerada a uma temperatura constante de 23°C, entrando em equilíbrio com o ambiente antes de serem impermeabilizados, a impermeabilização ocorreu para a verificação da eficiência dos produtos impermeabilizantes. Segundo Albertini (2014), a impermeabilização foi feita utilizando-se pincel e com aplicação de duas “demãos”, de acordo com o procedimento recomendado pelos fabricantes, pois em todos os casos a aplicação poderia ser feita com pincel e o número de demãos recomendado era de no mínimo dois em alguns casos e de no máximo duas em outros. A figura 5656 mostra a aplicação de um dos produtos.

Figura 56- Impermeabilização dos corpos de prova.



Fonte: Albertini (2014).

Na aplicação dos impermeabilizantes, os furos foram protegidos com espuma preenchendo-os totalmente, após a secagem os furos foram selados utilizando-se, além da espuma, uma proteção com massa de calafetar cobrindo a superfície. O resultado da vedação pode ser observado na Figura 5757.

Figura 57 - Vedação dos orifícios.



Fonte: Próprio autor.

Para Albertini (2014), testar a eficiência dos produtos em não permitir a entrada de água no interior dos CPs ou permitir a saída de vapor de água, os CPs

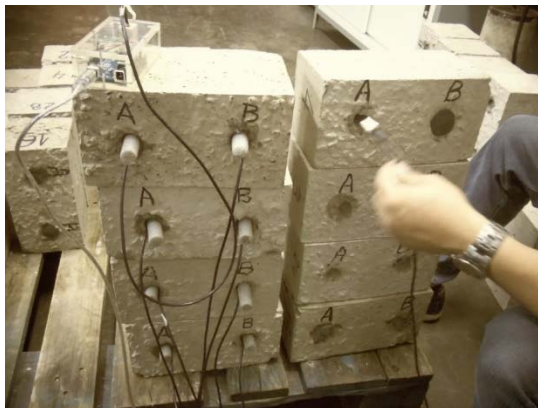
foram submetidos a ciclos em câmara úmida entremeados por exposição ao ar livre onde eram submetidos a sol intenso. A umidade do ar no interior dos orifícios dos corpos de prova foi monitorada semanalmente, tempo que correspondeu a cada ciclo, totalizando oito semanas de ensaio.

No período de ensaio a temperatura média na cidade de Ilha Solteira-SP, foi de 26,3°C com máxima de 33,5°C e a UR média do ar foi de 52,2%, segundo os dados climáticos da estação monitorada pelo Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da Unesp. (<http://clima.feis.unesp.br>) (Albertini, 2014).

Os CPs foram retirados dos ambientes de exposição no final de cada ciclo e colocados na sala onde se executou a impermeabilização com o objetivo de manter a mesma temperatura na leitura da umidade relativa, pois a mesma é influenciada pela temperatura, assim, a umidade relativa do ar é dada pela razão entre a quantidade de vapor real do ar verificada e a quantidade máxima de vapor possível do ar nessa temperatura (ALBERTINI, et al., 2014; CURISTOPHERSON, 2012).

A medição dos dados de UR e temperatura no interior dos furos era através da colocação dos sensores e posteriormente uma espuma após o mesmo com o intuito que a umidade externa não alterasse as leituras, foi aguardado 2 minutos para que os sensores entrassem em equilíbrio com o ar no interior dos furos dos CPs. O software gravou os resultados da leitura em um banco de dados para posterior análise. A figura 5858 mostra o processo de leitura: os sensores ficavam isolados dentro dos furos e a leitura dos dados era feita pelo hardware e enviados para o computador onde se monitorava em tempo real a UR e temperatura.

Figura 58 - Procedimento para leitura de umidade e temperatura no interior do concreto.



Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de investigar a UR das estruturas de concreto curados há algumas décadas para confirmar as afirmações feitas por Farny (2007), utilizou-se CPs no LCEC, em um local denominado “cemitério”, onde se encontram amostras de concretos utilizados nas Usinas Hidroelétricas construídas pela CESP nas décadas de 1960 a 1970. Segundo Albertini (2014) a figura 5959 mostra o “cemitério” do LCEC.

Figura 59 - Corpos de prova das décadas de 1960 a 1970, no LCEC.



Fonte: Albertini (2014).

Com o sistema de monitoramento foi possível medir a umidade relativa em um dos CPs mais antigos feitos pela CESP que datava de 20 de agosto de 1971, a medição ocorreu em 16 de julho de 2013 a aproximadamente 42 anos da sua execução, para efetuar a medição foi executado um furo de 2,2 cm de diâmetro com 6 cm de profundidade, a mesma utilizada nos CPs do ensaio, inseriu-se o sensor no furo, como mostra a figura 6060.

Figura 60 - Verificação da umidade interna no concreto.

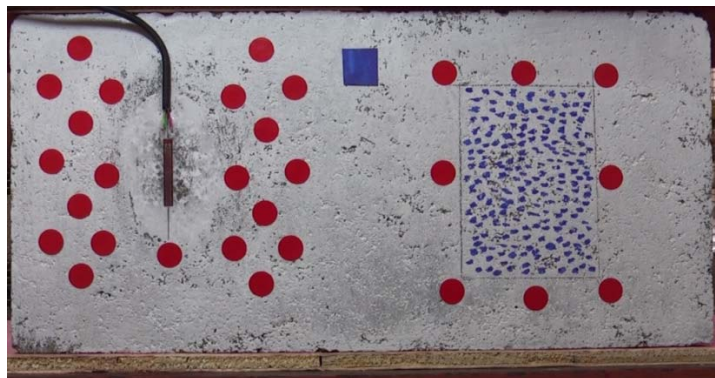


Fonte: Próprio autor.

5.3 Sistema de monitoramento de deslocamentos

Segundo Hang (2016), para melhorar a precisão do CID, as imagens de manchas são mais comumente usadas onde a informação de intensidade é extraída de padrões de alto contraste, iluminados com luz incoerente, na superfície do corpo a ser analisado. Os padrões de salpicos são tipicamente aplicados usando técnicas de pintura em spray, embora a pesquisa tenha sido conduzida no uso de padrões impressos gerados por computador e também o uso de padrões naturais já na superfície analisada. Esses padrões são armazenados na forma de conjuntos de imagens de referência e deformadas. A figura 6161 mostra o corpo de prova ensaiado, foi colocado como referência vários padrões de grade e um extensômetro para a avaliação dos resultados.

Figura 61 – Corpo de prova com vários padrões de grade.



Fonte: Próprio autor.

6 RESULTADOS E ANÁLISE

6.1 Respostas dos sensores avaliados

As características de operação dos sensores são apresentadas na tabela 11. As vantagens do uso destes sensores são o menor custo de aquisição e menor tempo de equilíbrio, quando comparados com o sensor do tipo bastão, que foi utilizado para a validação do sensor utilizado, na tabela 12 a comparação entre eles.

Tabela 11 - Características dos sensores.

Características	SHT 11	DHT 22	iButton 1923
Temperatura de operação (°C)	-40 a 123,8	-40 a 125	-20 a 85
Precisão (°C)	0,5 (a 25°C)	0,5	0,5
Umidade de operação (%)	0 a 100	0 a 100	0 a 100
Precisão (%)	3,5	2 a 5	5 *

Nota: * variável com uso de software de correção.

Fonte: Albertini (2014).

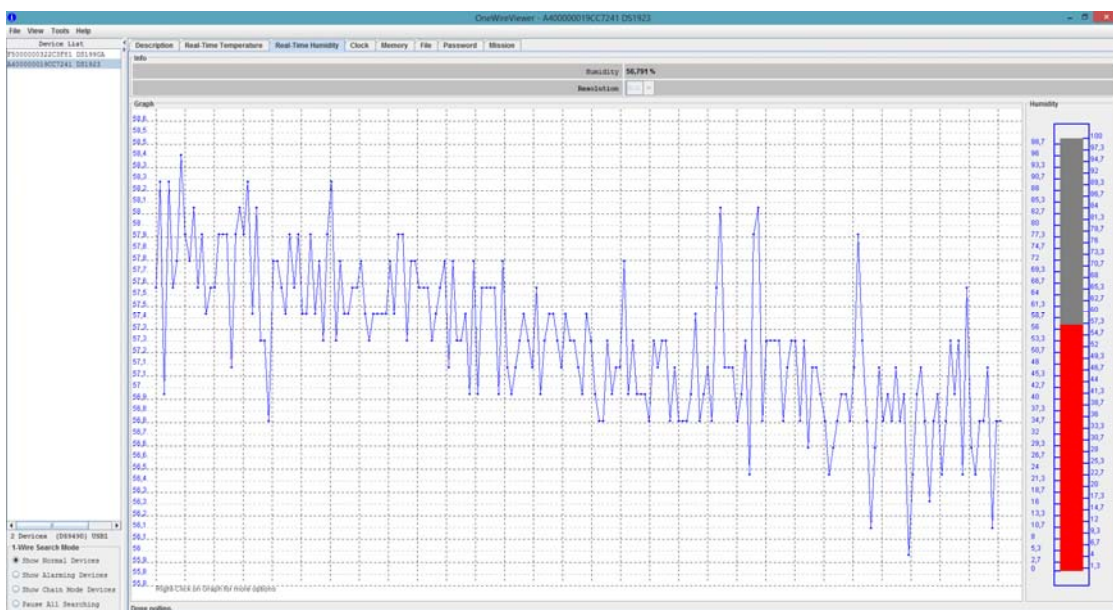
Tabela 12 - Comparação das características dos sensores.

Característica	SHT 11	DHT 22	IButton 1923
Dimensões	Menor dimensão	Maior dimensão	Dimensão intermediária, mas difícil manuseio para inserir no orifício
Custo	U\$ 14,70	U\$ 8,00	U\$ 191,30
Durabilidade	Não durável	Durável	Não avaliada, mas depende da bateria
Tipo de Dado	Analógico	Digital	Digital
Sistema de Aquisição de dados	Necessita curva de calibração e prévio processamento	Necessita desenvolvimento de sistema de aquisição (porém simples)	Necessita aquisição do dispositivo de leitura, pronto para uso
Qualidade dos dados	Boa	Boa	Apresenta ruídos (*)

Fonte: Albertini (2014).

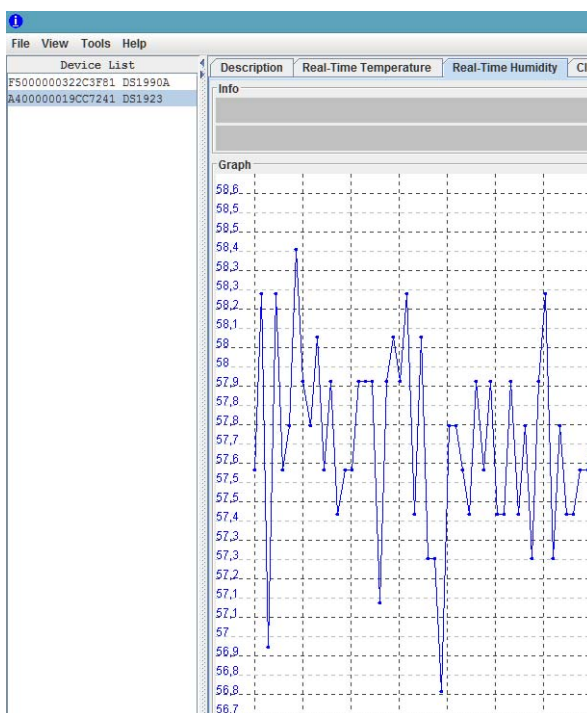
(*) Testes feitos com o sensor iButton 1923 mostraram dados com bastante ruídos para a umidade relativa (figura 62), e para a temperatura (figura 64) se mostrou mais estável, no software do mesmo fabricante. Na figura 6263, foi ampliado a figura 6362 para verificar a oscilação nos dados do sensor iButton, os dados são lidos a cada segundo.

Figura 62 – Leitura da UR no iButton 1923 com o DS9490B.



Fonte: Próprio autor.

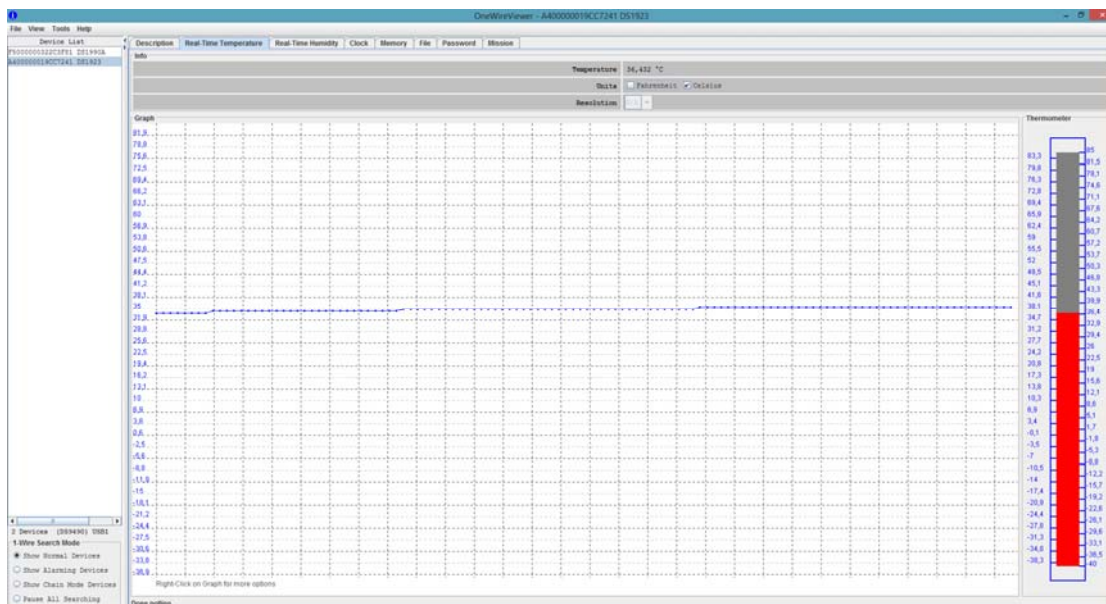
Figura 63 – Ampliação para verificação de oscilação nos dados do sensor iButton.



Fonte: Próprio autor.

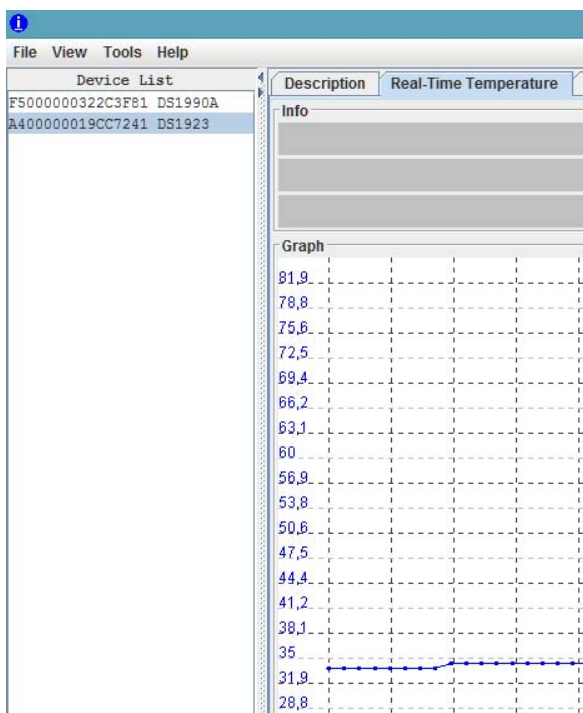
Na figura 6565, foi ampliado a figura 6464 para mostrar a oscilação da temperatura medida.

Figura 64 - Leitura da temperatura no iButton 1923 com o DS9490B.



Fonte: Próprio autor.

Figura 65 - Ampliação para verificação de oscilação nos dados do sensor iButton.



Fonte: Próprio autor.

A UR medida em todos os corpos de prova novos, com permeabilidade igual à utilizada em estruturas de concreto de barragens, foi de 99,9%, na temperatura de 23°C.

Como a UR dos corpos de prova estavam em 100%, os mesmos foram colocados para secar ao ar livre com o intuito da redução da UR. Porém, após 15 dias, a UR se manteve constante nos 99,9%.

Os corpos de prova foram a seguir levados a uma estufa de laboratório e mantidos a uma temperatura de 50°C, durante 15 dias, sendo monitorados continuamente. No final deste período, a UR nos orifícios de 6 cm de profundidade era de aproximadamente 75%, porém aqueles de 12 cm, estavam com UR acima de 90%, conforme mostrado na tabela 13.

Tabela 13 – CP's 15 Dias a 50°C

CP	UR	UR	UR	UR
	(%) 6 CM	(%) 6 CM	(%) 12 CM	(%) 12 CM
1	75,6	75,8	97,5	97,8
2	74,7	74,6	97,6	99,9
3	76,4	76,9	96,4	99,9
4	76,1	76,3	99,9	95,4
5	75,4	75,1	98,3	99,9
6	74,9	74,3	96,4	97,1
7	76,9	76,8	99,6	99,9
8	75,8	75,6	98,2	99,9
9	73,0	73,1	92,2	92,0
10	77,3	77,2	97,4	99,2
11	73,4	73,6	97,9	98,6
12	76,1	75,9	96,2	96,6
13	75,1	75,1	94,8	95,1
14	74,6	74,2	94,7	94,8

Fonte: Próprio autor.

Como pôde-se observar, nestes corpos de provas foi necessário elevar a temperatura do ambiente a 50°C e, mesmo assim, os orifícios com 12cm mantiveram umidade elevada, acima de 90%.

Desta forma, considerando que os blocos de concreto de barragens possuem dimensões bem maiores que os corpos de prova utilizados, mesmo que a temperatura ambiente fosse de 50°C, haveria a RAA.

Baseado nos resultados anteriores, os novos corpos de prova foram confeccionados apenas com orifícios de 6 cm, pois com 12 cm pouco se alterava a umidade. A intenção era propiciar condições para diminuir a umidade interna, elevando a temperatura, e utilizar um traço menos denso, ou seja, com maior permeabilidade.

A UR nos corpos de prova manteve-se em 99,9% na temperatura de 23°C, similarmente aos corpos de prova anterior.

No passo seguinte, foram levados à estufa do laboratório a uma temperatura de 60°C. Depois de 16 dias, a umidade ficou abaixo do 80%, como pode-se verificar na tabela 14.

Tabela 14 – CP's 16 Dias a 60°C

CP		UR (%)	CP		UR (%)	CP		UR (%)
1	A	77,8	12	A	77,7	23	A	77,8
	B	77,4		B	77,7		B	77,8
2	A	76,7	13	A	76,6	24	A	77,8
	B	76,8		B	76,8		B	77,6
3	A	77,0	14	A	76,7	25	A	76,8
	B	77,0		B	76,7		B	77,1
4	A	76,6	15	A	77,5	26	A	77,4
	B	76,5		B	77,7		B	77,9
5	A	77,2	16	A	76,9	27	A	77,5
	B	76,9		B	76,9		B	77,4
6	A	76,9	17	A	76,9	28	A	76,9
	B	76,9		B	76,8		B	77
7	A	76,8	18	A	76,9	29	A	77,8
	B	76,7		B	76,6		B	77,7
8	A	77,9	19	A	76,8	30	A	77,2
	B	78,0		B	76,7		B	77,2
9	A	76,9	20	A	76,9	31	A	77,3
	B	77,1		B	76,9		B	77,4
10	A	76,8	21	A	77,2			
	B	76,6		B	77,2			
11	A	77,4	22	A	77,3			
	B	77,5		B	77,2			

Fonte: Próprio autor.

O sistema se mostrou eficiente para o fim proposto, com o monitoramento dessas duas variáveis chegou-se à conclusão de que mesmo em concretos com idades avançadas a UR é de 100%, portanto não precisam ser monitorados, pois essa umidade já é favorável a RAA.

O sistema proposto acrescentou à pesquisa da RAA a comprovação técnica de que no interior do concreto a UR é maior que 80%, até então supostas em trabalhos anteriores, portanto, quanto maior a profundidade do ponto a ser medido mais próximo dos 100%.

Pode-se utilizar o sistema proposto para outras finalidades, vale ainda ressaltar que no caso de obras hidráulicas deve-se tomar o cuidado da impermeabilização das superfícies em contato com a umidade externa. Uma vez que a umidade que desencadeia a RAA é externa ao concreto.

6.2 Umidade relativa no interior do concreto com mais de 40 anos de idade

Os valores lidos pelo sistema de monitoramento mostraram que a temperatura dentro do furo do cp era de 23,3°C e UR de 99,9%. Como o resultado obtido não foi o esperado, pois o concreto, teoricamente, com essa idade teria que ter pelo menos um valor menor da UR interna, portanto resolveu-se aumentar a investigação, foi realizado o mesmo procedimento em um pilar do LCEC, conforme a figura 6666.

Figura 66 - Pilar do LCEC onde foi medida a umidade interna no concreto.



Fonte: Albertini (2014).

O LCEC foi criado no final da década de 1960 com dois departamentos principais: Engenharia Civil e Eletromecânica, o pilar medido possui mais de 40 anos de idade, o valor da UR medido no furo do pilar a uma temperatura de 24,0°C foi de 99,9%, a temperatura medida no local da investigação era de 24°C e a UR era de 65,7%, conforme a Tabela 15 e Tabela 16. Confirmando mais uma vez que mesmo estruturas com idades avançadas estão pré-dispostas a apresentarem a RAA, principalmente as usinas hidroelétricas, pois estão constantemente em contato com a umidade.

Tabela 15 – Umidade Relativa dos Corpos de prova com mais de 40 anos de idade.

CP	UR (%)	TEMP
1	99,7	23,5
2	99,9	23,5
3	99,9	23,5
4	99,8	23,8
5	99,9	23,6
6	99,9	23,6
7	99,9	24,3
8	99,8	23,8
9	99,6	23,8
10	99,9	23,9

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 - Pilares da década de 1960

PI	UR (%)	TEMP (°C)
1	99,9	24,0
2	99,9	24,2
3	99,9	24,3
4	99,9	24,8
5	99,9	23,9

Fonte: Próprio autor.

6.3 Comparação dos métodos de correlação de imagens

Existem vários métodos CID para se medir a deformação de imagem digital, que pode ser utilizado para monitorar fissuras, Yuan (2014) elaborou um novo método de medição de deformação de imagem digital utilizando um padrão de retângulo pintado e dois níveis de precisão, nível de pixel e subpixel, utilizou-se os softwares ImageJ™ e Matlab™, respectivamente. Dois algoritmos de nível de subpixel diferentes, ajuste gaussiano e interpolação de *spline*.

Os resultados usando o padrão de retângulo pintado foram comparados ao método CID (mancha) e métodos tradicionais de medição de deformação, incluindo extensometria laser e strain gages.

O método de detecção de borda de retângulo é um método de deformação baseado em previsão, que considera explicitamente a deformação do alvo (retângulo) para calcular a tensão. O método CID usa a mudança relativa de

deslocamento dos subconjuntos para determinar a tensão. No entanto, a deformação dos próprios subconjuntos é ignorada.

O método de medição de deformação no nível de pixel usando ImageJ™ não é adequado para materiais com capacidades de deformação muito pequenas (neste estudo, $\varepsilon \approx 10^{-4}$). Para medição de micro-deformação, o método de medição de deformação em nível de subpixel deve ser usado.

Um retângulo pode ser um padrão adequado para atingir a precisão do nível de subpixel da medição de deformação. Tanto o ajuste gaussiano quanto os métodos de interpolação *spline* fornecem precisão semelhante à extensometria laser e strain gages se a resolução de imagens for adequada.

Ao comparar os dois métodos de retângulo subpixel, o método de ajuste de Gauss dá melhores resultados do que o método de interpolação *spline*. Para o método de montagem gaussiano, o coeficiente de determinação (R^2) é usado para avaliar a qualidade do ajuste. O método de montagem gaussiano pode filtrar alguns dados por meio de ajuste (R^2). Os dados foram usados apenas quando $R^2 \geq 0,9$. O método de interpolação conecta todos os dados conhecidos para encontrar os dados desconhecidos.

O módulo de Young (E) de uma amostra foi calculado encontrando a inclinação das curvas de tensão-deformação axial. Os quatro métodos de medição da deformação utilizados por Yuan (2014) (extensometria laser, strain gages, ajuste gaussiano e interpolação de *spline*) mostram módulos muito semelhantes com uma diferença <10%. Excluindo a interpolação *spline*, os outros três métodos têm um coeficiente de determinação (R^2) superior a 99%.

Yuan (2014) comparou a imagem utilizando o iPhone 4s e não o recomenda para utilizar como um dispositivo de medição de deformação, uma vez que, os resultados das imagens baseadas no iPhone mostram grande desvio dos outros métodos. No entanto, com o rápido ritmo de desenvolvimento nos recursos da câmera do iPhone, a medição da deformação usando o iPhone pode ser possível em breve.

CID é um método de medição de deformação de campo completo. O resultado da deformação para cada imagem é o valor médio de todos os subconjuntos. O resultado CID no teste de Yuan (2014) teve grande desvio dos métodos de referência. Como a CID usa o deslocamento relativo de um subconjunto para calcular a tensão, qualquer vibração do sistema de teste reduzirá na precisão do método CID.

7 CONCLUSÕES

Em virtude dos resultados encontrados no monitoramento da umidade relativa e temperatura do concreto em usinas hidroelétricas, demonstrou-se a relevância do trabalho em mostrar que a umidade verificada no concreto mesmo depois de várias décadas, apresentava valores próximos de 100%, acreditava-se por meio da literatura que a umidade interna acima de 80% era fator preponderante para o aparecimento da RAA, desta forma, pode-se então, em trabalhos futuros, firmar a observação em que nas obras hidráulicas, uma das três condições para formação da RAA já ocorre (umidade relativa acima de 80%), devendo-se então, providenciar medidas para conter ou reduzir as outras duas variáveis: “presença de minerais reativos no agregado e presença de álcalis na pasta de cimento”.

Diante das constantes atividades de monitoramento da umidade relativa executada em usinas hidroelétricas, torna-se dispensável então este serviço, desde que o concreto esteja em constante contato com a água.

Após a constatação de a UR ser praticamente 100% no interior do concreto, mesmo em idades avançadas (mais de 40 anos), entende-se que as fissuras ocorridas são provenientes de dentro para fora, onde a nucleação da RAA surge nas regiões de maior estado energético, locais onde se encontra uma umidade relativa máxima.

Quanto ao uso de métodos de correlação de imagens para o monitoramento de fissuras provocadas pela RAA em obras hidráulicas, definiu-se neste trabalho que o método mais promissor na área de CID é o DSCM, pois o concreto com a RAA apresenta um padrão de malha bem singular, em especial do tipo mapa.

A qualidade da imagem é um fator crítico no método da imagem digital. Para obter imagens de alta qualidade, é necessária uma câmera de alta resolução, iluminação estável e suporte sem vibração.

Com o avanço dos equipamentos de imagens digitais pode-se monitorar o avanço das fissuras em estruturas com a RAA, o método DSCM deve ser utilizado para o monitoramento dessas estruturas, de acordo com o levantamento proposto. No entanto, espera-se que programas de processamento de imagens apresentem um melhor refinamento da conversão de imagens de alta definição para os

parâmetros necessários para o CID. Visto que, atualmente não foi verificado mudanças significativas na leitura dos deslocamentos.

É necessário que os programas que fazem o rastreamento e localização de marcadores usando o critério de correlação cruzada, possam ter funções incorporadas que atendam a resolução de câmeras digitais de alta resolução (como as 4k), visto que, atualmente o rastreamento é de apenas 4 pixel (função "cpcorr.m" incorporada no MATLAB™). Ou seja, se a correlação for insuficiente, isso causará imprecisões.

REFERÊNCIAS

- ALBERTINI, P. G **Sistema de proteção superficial de estruturas de concreto de usinas hidrelétricas para controle da Reação Álcali-Agregado**. 2014, 125 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2014.
- ASUNDI, A., NORTH, H. White-light speckle method: current trends. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 29, n. 2-3, p. 159-169, 1998.
- BATTAGIN, A. F. Divulgando conhecimento sobre a RAA para sua prevenção. **Concreto e Construções - Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON**, São Paulo, v. 83, p. 8-16, 2016.
- BADAMASI, Y. A. The working principle of an Arduino. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMPUTER AND COMPUTATION (ICECCO), 11., 2014, Abuja. **Proceedings...** Abuja: [s. n.], 2014. p. 1-4.
- BORNERT, M.; DOUMALIN, P.; DUPRÉ, J. C.; POILANE, C.; ROBERT, L.; TOUSSAINT, E.; WATTRISSE, B. Shortcut in DIC error assessment induced by image interpolation used for subpixel shifting. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 91, p. 124–133, 2017.
- CARASEK, H, CASCUDO, O., CAETANO, G. Contribuição à previsão de danos para estruturas de concreto atacadas pela reação álcali-silica. **Concreto e Construções - Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON**, São Paulo, v. 83, p. 8-16, 2016.
- DI RENNA, R. B.; BRASIL, R. D. R.; CUNHA, T. E. B. **Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino**. Niterói: Universidade Federal Fluminense – UFF, Escola de Engenharia – TCE, 2013. 79 p. Relatório.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Modern control systems, translation**. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 659 p.
- EBERL, C.; THOMPSON, R.; GIANOLA, D.; BUNDSCHUH, S. **Digital image correlation and tracking**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12413-digital-image-correlation-and-tracking>>. Acesso em: 12 nov. 2017.
- FARNY, J.; KERKHOFF, B. **Diagnosis and control of alkali-aggregate reactions in concrete**. [S. l.]: Portland Cement Association, 2007. 26 p.
- FAYYAD, T. M.; LEES, J. M. Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture. **Procedia Materials Science**, Amsterdam, v. 3, p. 1585-1590, 2014.
- GONG, P.; PATTON, M. E.; LIU, C.; OPPENHEIM, I. J.; GREVE, D. W.; HARLEY, J. F.; JUNKER, W. R. Ultrasonic detection of the alkali-silica reaction damage in concrete. In: IEEE INTERNATIONAL ULTRASONICS SYMPOSIUM, 2014, Chicago. **Proceedings...** New York: IEEE, 2014. p. 361-364.

HANG, D.; HASSAN, G. M.; MACNISH, C.; DYSKIN A. Characteristics of color digital image correlation for deformation measurement in geomechanical structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL IMAGE COMPUTING: TECHNIQUES AND APPLICATIONS (DICTA), 2016, Gold Coast. **Proceedings...** New York: IEEE, 2016. p. 1-8.

HASHEMI, A. K. M.; ZOUGHI, D. R.; KURTIS, K. E. Effect of humidity on dielectric properties of mortars with alkali-silica reaction (ASR) gel. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (I2MTC), 2015, Pisa. **Proceedings...** New York: IEEE, 2015. p. 1502-1506.

HASHEMI, A.; KURTIS, K. E.; DONNELL, K. M.; ZOUGHI, R. Empirical multiphase dielectric mixing model for cement-based materials containing alkali-silica reaction gel. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 66, n. 9, p. 2428-2436, 2017.

HASPARYK, N. P. **Investigação de Concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. Reação álcali-agregado em barragens. **Concreto e Construções - Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON**, São Paulo, v. 46, p. 38, 2006.

HOU, H., ANDREWS, H. Cubic splines for image interpolation and digital filtering. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing**, v. 26, n. 6, p. 508-517, 1978.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO – IBRACON. **52º Congresso Brasileiro do Concreto Seminário debate as causas da RAA, suas medidas preventivas, o diagnóstico e soluções para estruturas afetadas**. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.ibracon.org.br/news/52CBC/52CBC_nov10_1.htm>. Acesso em: 12 nov. 2017.

KISHORE, K. Alkali-silica reaction in concrete. **Bulletin of Indian Concrete Institute**, [S. l.], p. 31-33, 1990.

JEON, J.; PAIK, J. Single image super-resolution based on subpixel shifting model, **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, Jena, v. 126, n. 24, p. 4954-4959, 2015.

KUPERMAN, S. C.; FERREIRA, W. V. F; FABBRO, J. C. D; NEGRINI, M. A; CIFÚ, S.; KAKO, H.; MARIANO, A.; TAVARES, F. Ocorrência de reação álcali-agregado em Tomada D'água. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ALCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Cartográfica, 1997. p. 213.

LAGATTU, F., BRIDIER, F., VILLECHAISE, P., BRILLAUD, J. (2006). In-plane strain measurements on a microscopic scale by coupling digital image correlation and an in

situ SEM technique. **Materials Characterization**, Philadelphia, v. 56, n. 1, p. 10-18, 2006.

LOPES, L. E. **Modelagem mecânica e numérica da reação álcali-agregado com aplicação a barragem de concreto**. 2004. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MAXIM INTEGRATED. **Datasheet: DS9094B USB to 1-Wire/iButton Adapters**. [S. l.]: Eletronic Publication, 2011. 6 p.

MAXIM INTEGRATED. **Datasheet: DS1923 iButton Hygrochron Temperature/Humidity Logger with 8KB Data-Log Memory**. [S. l.]: Eletronic Publication, 2013. 155 p.

MIZUMOTO, C. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. 2009. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2009.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. **Image processing and analysis in Java**. [S. l.], 2017. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 12 nov. 2017.

NEKOOGAR, F., MORIARTY, G. **Digital Control using digital signal processing**, New Jersey: Prentice Hall, 1999. 433 p.

OLIVEIRA, R. A. O Colapso do edifício areia branca e os novos conceitos de vistorias de edifícios. **Concreto e Construções - Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON**, São Paulo, v. 46, n. 2, p. 18-21, 2007.

PAN, B., ASUNDI, A., XIE, H., GAO, J. (2009). Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements. **Optics and Lasers in Engineering**, London, v. 47, n. 7-8, p. 865-874, 2009.

PAN, B., XIE, H., WANG, Z. Equivalence of digital image correlation criteria for pattern matching. **Applied Optics**, Washington, v. 49, n. 28, p. 5501-5509, 2010.

PREZZI, M.; KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. Importância da química de superfície na reação álcali-agregado. In: SIMPÓSIO SOBRE REATIVIDADE ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 1., 1997, Goiânia. **Anais...** Goiânia: CBGB/FURNAS, 1997. p. 173-196.

SALDAÑA, H. A., MÁRQUEZ A. P. A., MOLINA, O. A. Concrete Stress-Strain Characterization by Digital Image Correlation. **Journal of Applied Mechanical Engineering**, Los Angeles, v. 4, n. 6, p. 1-5, 2015.

SCHREIER, H., BRAASCH, J., SUTTON, M. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. **Optical Engineering**, Bellingham, v. 39, n. 11, p. 2915-2921, 2000.

SHANG, Y., CHEN, J., TIAN, J. The study of sub-pixel edge detection algorithm based on the function curve fitting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, 2010, Wuhan. **Proceedings...** New York: IEEE, 2010. p. 1-4.

SILVA, T. I. **Implementação de um sistema para geração e avaliação de movimentos em pacientes Hemiplégicos.** 2007. 194 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, São Paulo, 2007.

SOLLERO, M. B. S. Avaliação de RAA na barragem de Pirapora. **Concreto e Construções - Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON**, São Paulo, v. 83, p. 69-74, 2016.

STARK, D.; MORGAN, B.; OKAMOTO, P. **Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity.** Washington: Strategic Highway Research Program (U.S.) and Construction Technology Laboratories (Portland Cement Association), National Research Council, Washington, 1993. 23 p.

STARK, D. **Handbook for the identification of alkali-silica reactivity in highway structures.** Washington: National Research Council, Strategic Highway Research Program, 1991. 49 p.

KUO, B. C., GOLNARAGHI, F. **Automatic control systems.** 8. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 609 p.

SABINO, D.D. **Medidas de deslocamento e vibrações através de imagens de câmeras digitais.** 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2013.

TONG, W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping application. **Strain**, Chichester, v. 41, n. 4, p. 167-175, 2005.

WATMAN, C., AUSTIN, D., BARNES, N., OVERETT, G., THOMPSON, S., Fast sum of absolute differences visual landmark detector, Robotics and Automation. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE, 2004, New Orleans. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004. p. 4827-4832.

YUAN, S. **Digital Image Correlation and Edge Detection: Applications in Materials Testing.** 2014. 218 f. Tese (Doutorado) – University of Miami, Miami, 2014.

ZHANG, J.; JIN, G.; MA, S.; MENG, L. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement. **Optics & Laser Technology**, London, v. 35, n. 7, p. 533-542, 2003.