



**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA UTILIZAÇÃO DA
RÉGUA POTENCIOMÉTRICA NA MONITORAÇÃO CONTÍNUA DE
FISSURAS EM CONCRETO**

VITÓRIA
2017



DIEGO GIURI PALAORO

LARISSA HELENA CARNIELLI HOWAT RODRIGUES

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA UTILIZAÇÃO DA
RÉGUA POTENCIOMÉTRICA NA MONITORAÇÃO CONTÍNUA DE
FISSURAS EM CONCRETO**

Trabalho de Conclusão do Curso apresetado ao curso de Pós Graduação em Patologia nas Obras Cíveis, pós graduação lato sensu, do Instituto IDD como requisito parcial para obtenção do Grau de Especialista em Patologia nas obras cíveis.

Orientador: Msc. Leonardo Rocentti da Silva

VITÓRIA

2017

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Idd pela responsabilidade e apoio.

Ao engenheiro civil prof. Leonardo Roncetti pela colaboração nas orientações deste trabalho.

Ao Thiago e ao Alexandre pela disponibilidade para os ensaios desenvolvidos.

Ao LEMAC pela disponibilidade e uso dos equipamentos.

A vidraçaria São José pelo apoio no desenvolvimento do protótipo.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA PARA UTILIZAÇÃO DA RÉGUA POTENCIOMÉTRICA NA MONITORAÇÃO CONTÍNUA DE FISSURAS EM CONCRETO

Por

DIEGO GIURI PALAORO

LARISSA HELENA CARNIELLI HOWAT RODRIGUES

**TRABALHO APROVADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ESPECIALISTA EM PATOLOGIA NAS
OBRAS CIVIS, DO INSTITUTO IDD, PELA COMISSÃO FORMADA PELOS
PROFESSORES A SEGUIR MENCIONADOS.**

Vitória (ES) ____ de _____ de _____.

Dante Trés Junior, Esp.

Lucas de Carvalho Sthel, Esp.

Stela Cristina Verus Assumpção, Esp

RESUMO

Os métodos para controle de fissura em elementos estruturais estão cada dia mais automatizados buscando formas para aumentar a segurança e garantir a estabilidade do elemento. O objetivo desse trabalho foi estudar a viabilidade da régua potenciométrica no monitoramento de fissuras em materiais de concreto. As análises foram feitas em um corpo de prova de 15x15cm, onde foi induzida uma fissura, acoplado a régua potenciométrica e o paquímetro, o protótipo, através de um parafuso, movia-se representando a abertura da fissura. Os resultados obtidos viabilizam a utilização da régua potenciométrica para o monitoramento de fissuras em elementos de concreto de forma qualitativa.

Palavras-chave: métodos não destrutivos; fissuras; estrutura concreto

ABSTRACT

The methods of crack control in structural elements are increasingly automated. The objective of this work was to study the feasibility of the potentiometric ruler and not the monitoring of cracks in concrete materials. As analyzes were done in a 15x15cm test body, where a crack was induced, coupled to a potentiometric ruler and the pachymeter, the prototype, through a screw, moved representing an aperture of the fissure. The results obtained allow the use of the potentiometric ruler for the monitoring of cracks in concrete elements in a qualitative way.

Keywords: non-destructive methods; Cracks; Concrete structure

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de bloco do dispositivo do sensor do movimento.....	21
Figura 2 - Estrutura do pequeno sistema de monitoramento de pontes de concreto	22
Figura 3- Esboço com dimensões da amostra de concreto com suas barras de reforço, sensores ultra-sônicos embutidos, transdutores externos, pistão e Área utilizada para análise de imagens digitais (DIC).	22
Figura 4- Diagrama esquemático do dispositivo de detecção.....	24
Figura 5 - Montagem teste para vigas concreto	25
Figura 6 - Laje de concreto reforçado com CFRP. (A) Detalhes do reforço de aço. (B) Detalhes da viga de CFRP monitorada com AE. (C) Posicionamento dos sensores de AE.....	26
Figura 7 - Esboço do esquema do sistema de monitoramento de fissuras sistema..	27
Figura 8 - Rastreamento aplicado a uma região de concreto rachado.....	28
Figura 9 - Esquema das medições elétricas DC por técnica de quatro terminais: (a) para compressão uniaxial e (b) para flexão de três pontos de carga.	29
Figura 10- Fissuras em função do tipo de solicitação predominante	36
Figura 11 - Surgimento de fissuras em lajes.....	37
Figura 12 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto (a). Fissuras por assentamento plástico em pilares acompanhando os estribos (b).	38
Figura 13 - Fissuras de retração em vigas (A). Em lajes (B).....	38
Figura 14 - Formação da reação alcali-agregado dentro do concreto	39
Figura 15 - Tipos de corrosão	40
Figura 16 - Fissura de recalque.	41
Figura 17 - Fissura de movimentação térmica.	42
Figura 18 - Controle fissura com selo de gesso..	43
Figura 19 - Imagem de um modelo de fissurometro.	44
Figura 20 - Controle de fissura pelo fissurômetro.....	45

Figura 21 - Geração, propagação e detecção das emissões acústicas..	46
Figura 22 - Exemplos de sensores EA.	46
Figura 23 - Imagem de uma modelo LVDT.	47
Figura 24 - Diagrama em blocos do algoritmo do processamento digital do sistema de visão computacional	49
Figura 25 - Diagrama de Blocos do Sistema de Monitoramento.	50
Figura 26 - Régua potenciométrica modelo KTR-50	51
Figura 27 - Paquímetro Digital	53
Figura 28 - Modelo de placa microcontroladora Arduino UNO.	54
Figura 29 – Bloco de concreto utilizado para o ensaio.	55
Figura 30 - Betoneira utilizada para produção dos blocos de concreto	56
Figura 31 - Moldes dos blocos de concreto	56
Figura 32 - Rompimento do bloco em concreto na prensa hidráulica	57
Figura 33 - Base para apoio do bloco de concreto	57
Figura 34 – Protótipo elaborado para os ensaios.	58
Figura 35 - Código de programação desenvolvido para o experimento.	59
Figura 36 - Diagrama de Protoboard	60
Figura 37 - Diagrama esquemático do circuito	60
Figura 38 – Ensaio para confiabilidade do paquímetro.	61
Figura 39 - Medida da fissura pelo fissurometro.	61
Figura 40 - Medida do fissurômetro na abertura final.	62
Figura 41 - Imagens do ensaio de 0 a 35 mm de deslocamento da fissura	63
Figura 41 – Cont.: Imagens do ensaio de 0 a 35 mm de deslocamento da fissura	64
Figura 41 – Cont.: Imagens do ensaio de 0 a 35 mm de deslocamento da fissura	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Estudos de utilização de ferramentas para monitorização de fissuras	20
Tabela 2 - Exigências relativas a fissuração em relação ao tipo de concreto e classe de agressividade ambiental	31
Tabela 3 – Classificação das fissuras conforme espessura	35
Tabela 4 - Comparativo dos métodos para ensaios não destrutivos	49
Tabela 5 - Resultado do teste 1	67
Tabela 6 - Resultado do teste 2	68
Tabela 7 - Resultado do teste 3	69

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação do teste 1 entre os valores corrigidos em milímetros da régua potenciometrica e o paquímetro	70
Gráfico 2 - Relação do teste 2 entre os valores corrigidos em milímetros da régua potenciometrica e o paquímetro	70
Gráfico 3 - Relação do teste 2 entre os valores corrigidos em milímetros da régua potenciometrica e o paquímetro	71

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	9
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.2. OBJETIVOS	15
1.2.1. Objetivo geral.....	15
1.2.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. JUSTIFICATIVAS.....	15
1.3.1. Tecnológicas	15
1.3.2. Econômicas	16
1.3.3. Sociais.....	16
1.3.4. Ecológicas.....	16
1.4. HIPÓTESE.....	16
1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. NORMATIZAÇÃO CONCRETO ARMADO: FISSURAS. 30	
3. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	32
3.1. PRINCIPAIS FORMAS DE OCORRÊNCIA DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	32
3.1.1. Fundações	33
3.1.2. Estruturas em concreto	33
3.1.3. Alvenarias de vedação.....	34
3.2. FISSURAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	34

3.2.1.	Deficiência de projeto:	36
3.2.2.	Contração plástica do concreto	37
3.2.3.	Perda de aderência.....	37
3.2.4.	Retração do concreto	38
3.2.5.	Reações expansivas	39
3.2.6.	Corrosão das armaduras	39
3.2.7.	Recalques diferenciais	41
3.2.8.	Variação de temperatura	41
4.	MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA O CONTROLE DE FISSURAS NA ESTRUTURA DE CONCRETO	43
4.1.	SELOS DE GESSO OU DE VIDRO	43
4.2.	FISSUROMETRO.....	44
4.3.	EMIÇÃO ACÚSTICA.....	45
4.4.	LVDT (LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMERS)	47
4.5.	IMAGEM DIGITAL	48
5.	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	50
5.1.	MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS	51
5.1.1.	Régua potenciométrica	51
5.1.2.	Paquímetro digital	53
5.1.3.	Placa de micro controlador	53
5.1.4.	Bloco em concreto.....	54
5.2.	MÉTODO	55
5.2.1.	Produção do bloco de concreto e indução da fissura	55
5.2.2.	Elaboração do protótipo	57

5.2.3. Ensaio elaborado	60
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
8. REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil, com o elevado crescimento, volta-se o olhar a qualidade final da construção, preocupando-se na ocorrência de manifestações patológicas principalmente no pós-ocupação, desenvolvendo formas de inspeção da estrutura nas construções em concreto (MARTINS & JUNIOR, 2011)

As maiores incidências de manifestações patológicas na estrutura de concreto são as fissuras, que aparecem tanto como uma retração da superfície de matriz cimentícia até uma demonstração de problemas graves na estrutura.

A partir do momento que as fissuras nos membros da construção são detectadas, é essencial que seu estado e atividade de crescimento e natureza de deformação sejam identificadas e monitoradas (KRAKHMAL'NY *et al.*, 2016).

A importância do monitoramento das fissuras na superfície de concreto, deve-se a vários fatores como o mais agravante a interferência das fissuras na integridade e vida útil das estruturas, pois facilita a permeabilidade de água no concreto, permitindo a infiltração de materiais erosivos, tais como cloreto e sulfato, acelerando assim o processo de envelhecimento (ZHAO *et al.*, 2015).

Na maioria dos casos, a percepção do aparecimento das fissuras na estrutura é determinada visualmente, com a ajuda de tiras de gesso ou tiras de vidro. No entanto, a desvantagem destes dispositivos é que eles são demorados e trabalhosos para empregar e não permitem a medição automatizada, além de não permitir o monitoramento em locais de difícil acesso (KRAKHMAL'NY *et al.*, 2016).

A procura da técnica de monitoramento para melhor desempenhar sua função nos reparos consequentes de patologia nas edificações, prevenindo possíveis desastres na construção civil, com o melhor custo benefício, deu origem a este projeto de pesquisa.

Por meio de pesquisa bibliográfica e programa experimental esta pesquisa busca viabilizar a utilização da régua potenciométrica no monitoramento contínuo de fissuras, indo além da técnica de análise visual aplicada nas vistorias das estruturas das edificações.

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

É possível utilizar a régua potenciométrica para monitoramento contínuo das fissuras em materiais de concreto?

1.2. OBJETIVOS

Neste item apresentam-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa a ser desenvolvida.

1.2.1. Objetivo geral

Estudar a viabilidade da régua potenciométrica no monitoramento de fissuras em materiais de concreto.

1.2.2. Objetivos específicos

- Comparar as diferentes técnicas de monitoramento de fissuras.
- Avaliar a forma de aplicação da régua potenciométrica.

1.3. JUSTIFICATIVAS

Neste item apresentam-se as justificativas tecnológicas, econômicas, sociais e ecológicas para elaboração da pesquisa a ser desenvolvida.

1.3.1. Tecnológicas

Atualmente o monitoramento das fissuras em vistorias nas edificações é feito de forma manual com equipamentos e ferramentas que podem ser manuseados de forma imprecisa.

Este trabalho visa encontrar uma forma de monitoramento automatizada que melhor retrata a movimentação da fissura na estrutura.

1.3.2. Econômicas

As dificuldades de manutenção em edificações são inúmeras e apontadas diretamente no orçamento, mobilização e técnicas que possibilitem uma intervenção eficaz.

Neste contexto a definição da técnica que desempenha sua função e de menor custo é um diferencial de importância econômica.

1.3.3. Sociais

O monitoramento da fissura através da régua potenciométrica é uma solução que apresenta custos reduzidos. A técnica poderá ser divulgada e adotada por uma maior parcela da sociedade.

1.3.4. Ecológicas

Com o prolongamento da vida útil dos concretos por meio da técnica de monitoramento é esperado uma redução no descarte dos materiais em concreto e no consumo conforme melhoria no processo de monitoramento e manutenção.

1.4. HIPÓTESE

O uso da régua potenciométrica irá facilitar a forma de monitoramento das fissuras nas edificações em concreto.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Buscando alcançar os objetivos, a pesquisa se desdobrará em duas etapas principais.

- A etapa inicial consiste em uma revisão bibliográfica e apresentação dos conceitos acerca das técnicas para monitoramento das estruturas de concreto, manifestações patológicas e métodos não destrutivos de controle de fissuras, através de consultas a dissertações, teses, monografias, artigos científicos, normas aplicáveis, a fim de obter subsídios suficientes para a etapa seguinte.
- O programa experimental é a etapa em que serão realizados ensaios laboratoriais com a criação do protótipo, utilizando régua potenciométrica, bloco em concreto, paquímetro digital e placa de micro controlador.
- Após a conclusão dos ensaios, os resultados serão analisados e comparados entre si.
- A etapa final consisti nas análises feitas a fim de tecer considerações sobre a aplicabilidade da régua potenciométrica no monitoramento de fissuras em estruturas de concreto.

1.6. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

A proposta desse projeto de pesquisa é estudar a viabilidade da utilização da régua potenciométrica no monitoramento de fissuras em estruturas de concreto e para isso o projeto se desdobrará no capítulos conforme segue:

O **Capítulo 01** apresenta a Introdução onde descreve o problema de pesquisa e seus objetivos, bem como delinea as principais justificativas para a realização deste estudo e os procedimentos metodológicos a serem adotados.

O **Capítulo 02** discorre a revisão bibliográfica, o estado da arte do monitoramento das fissuras que estão sendo apresentados em âmbito nacional e internacional.

O **Capítulo 03** apresenta conceitos e estudos sobre manifestações patológicas focando as ocorrências de fissuração nos elementos em concreto.

O **Capítulo 04** apresenta conceitos e estudos sobre métodos não destrutivos de controle de fissura, acentuando as formas de monitoramento.

O **Capítulo 05** trata-se do programa experimental com a descrição dos métodos, materiais, equipamentos e ferramentas a serem utilizados e desenvolvidos no experimento.

O **Capítulo 06** apresentação e análise dos resultados, apontando os pontos e os pontos contra do equipamento, discutindo os resultados.

O **Capítulo 07** apresenta as considerações finais acerca da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A segurança das infraestruturas da construção civil durante as suas operações normais não podem ser negligenciadas, conforme qualquer problema de saúde, como um resultado deles pode causar graves perdas de vida e propriedade.

Devido ao envelhecimento, as cargas, as condições ambientais e os eventos extremos como vendavais, afetam as estruturas e podem deteriorar em seu desempenho lentamente, ou ser danificado severamente. Dessa forma o monitoramento da estrutura, torna-se essencial para a segurança das mesmas. (ZHOU *et al.* 2016).

O termo "monitoramento" ao longo do tempo deixou de ser entendido como a observação do ambiente, e as suas alterações nos impactos de fatores de risco na natureza e passou a significar um sistema de acompanhamento de projetos de construção, a fim de impedir sua demolição, sendo monitorados os sistemas quando é necessária assegurar sua segurança e bom funcionamento (KRAKHMAL'NY *et al.*, 2016).

No monitoramento quando são detectadas fissuras sobre os membros da construção, é essencial para identificar o estado e o crescimento da atividade, assim como a natureza da deformação das estruturas e o risco para a operação adicional de toda instalação (KRAKHMAL'NY *et al.*, 2016).

A atividade de crescimento da fissura muitas vezes é determinada visualmente, com o uso de ferramentas e materiais como o gesso, o *vidro Tell-Tale tiras* ou dispositivos de placa de fenda de medição. No entanto, estes dispositivos são demorados, trabalhosos e não permitem a medição automatizada e em locais de difícil acesso. (KRAKHMAL'NY *et al.* 2016; WOLF *et al.* 2015).

Além das técnicas usuais no canteiro, novas técnicas não destrutivas têm sido propostas para monitoramento da fissura, como uso de aparelhos ultrassônicos no interior do concreto (WOLF *et al.*, 2015), usos de fibra ótica com sensores (ZHAO *et al.*, 2015), aprimoramento de sistemas remotos por sensores de transformador diferencial variável linear (LVDT - sigla inglês) (KRAKHMAL'NY *et al.*, 2016) e emissão acústica (DEGALA *et al.*, 2009). No

entanto, muitas vezes possuem restrições quando aplicados em projetos reais, pois detectam apenas as fissuras pré-existentes em uma estrutura, não fornecendo informações sobre seu desenvolvimento (Zhao *et al.*, 2015).

Esses e alguns outros estudos sobre a utilização de equipamentos e ferramentas para monitoramento de fissuras na construção civil são apresentados na tabela 1 a seguir.

Tabela 1– Estudos de utilização de ferramentas para monitorização de fissuras. (Acervo pessoal)

Referência	Principais ferramentas
Krakhmal'ny <i>et al.</i> , 2016	Sensores LVDT; transmissão a rádio
Wolf <i>et al.</i> , 2015	Sensores ultrassônicos, imagem digital e emissão acústica
Zhao <i>et al.</i> , 2015	Fibra ótica; sensores LVDT
Degala <i>et al.</i> , 2009	Emissão acústica (AE); fibra de carbono
Bernstone & Heyden, 2009	Imagem digital
Chen & Liu, 2008	Emissão acústica (AE); resistência elétrica e fibra de carbono
Orlowski & Lacerda, 2003	Termômetros de mercúrio; medidores triortogonais e de fissuras manuais e automatizados.

Krakhmal'ny *et al.* (2016) estudaram o monitoramento da condição técnica das pontes e sistemas remotos apresentado por diversos autores através de sensores de movimento LVDT.

No entanto esse sistema de medição sozinho possui uma fraqueza pois elimina a possibilidade de transferência de dados sem fio para um computador, o que reduz significativamente a área de sua aplicação. Krakhmal'ny *et al.* (2016) em seu estudo conseguindo trazer melhorias para o monitoramento da abertura de fissuras em pontes permitindo a tomada de medidas em tempo real, automatizando o processo de transmissão de dados por comunicação sem fio e permitindo a leitura do maior número possível de fissuras.

O resultado técnico desta invenção foi permitir a automatização da medição de larguras das aberturas em um grande número de fissuras, o que é especialmente importante nos casos em que as fissuras monitorizadas se encontram em locais de

difícil acesso. O sistema de monitorização incluiu um ou mais sensores de movimento e um dispositivo de gravação, para o qual um computador pode ser usado.

Na figura 4 os autores demonstram o funcionamento dos sensores que trabalham monitorando a fenda, quando a mesma se abre a distância entre o sensor e o batente da haste retrátil (representado nº11) aumenta, como resultado a haste (representada nº4) do indicador segue o batente e o indicador (representado nº 1) mostra o deslocamento.

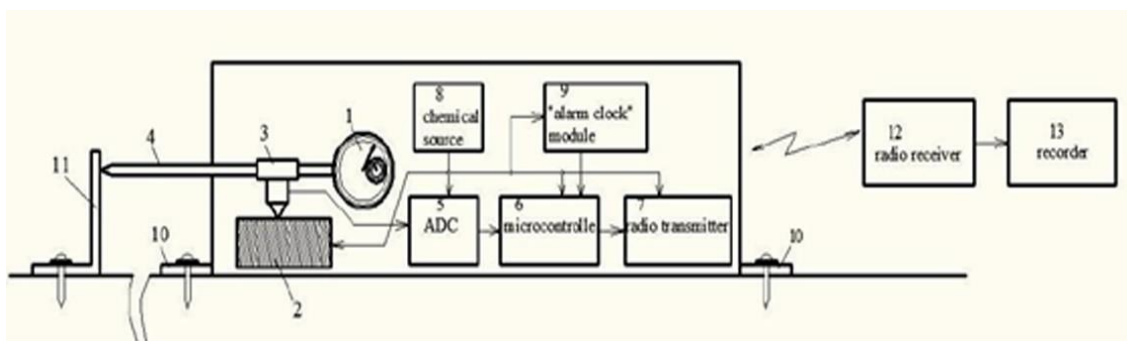


Figura 1 - Diagrama de bloco do dispositivo do sensor do movimento: 1- indicador do seletor; 2- corredeiras; 3- coletor de corrente deslizante móvel; 4 - haste retrátil; 5 - Conversor analógico-digital; 6- micro controlador; 7- transmissor de rádio; 8 - fonte química de tensão de alimentação; 9 - "despertador" módulo; 10 - apoios; 11 - batente da haste retrátil; 12 - receptor de rádio; 13 – gravador (KRAKHMAL'NY et al. 2016, p. 2371).

O coletor do sinal (representado nº3) passa o sinal para o converso analógico-digital (representado nº 5) que repassa ao micro controlador (representado nº 6). A fim de eliminar o uso de fios o sinal é transferido pelo módulo de rádio transmissão (representado nº7 e nº12) que transmite o valor do deslocamento para o dispositivo de gravação (representado nº13).

Krakhmal'ny *et al.* (2016) ressaltam que os sensores devem ser montados em diferentes partes da estrutura para monitoramento, os dados são encaminhados a um centro de processamentos de dados para análise (figura 5).



Figura 2 - Estrutura do pequeno sistema de monitoramento de pontes de concreto. (KRAKHMAL'NY et al., 2016, p. 2372).

Os resultados desse estudo apresentados por Krakhmal'ny *et al.* (2016) viabiliza o sistema de monitorização da abertura de fissuras em elementos estruturais de pontes, projetando a instalação de vários sensores em diversas pontes em uma região. Esse gerenciamento levará maior segurança, durabilidade, evitando o colapso acidental da estrutura.

Wolf *et al.*, (2015) estudaram a introdução de sensores ultrassônicos instalados na estrutura em locais de difícil acesso antes da concretagem da mesma para o monitoramento das fissuras comparando os resultados como outros metodos não destrutíveis como emissão acústica e imagem digital.

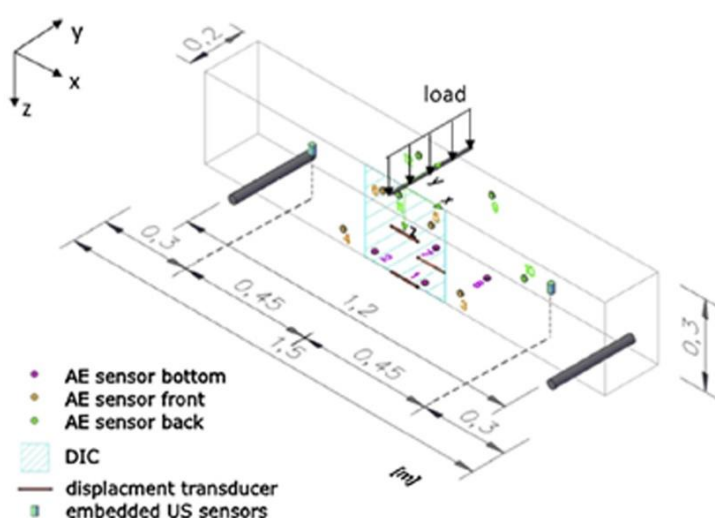


Figura 3- Esboço com dimensões da amostra de concreto com suas barras de reforço, sensores ultra-sônicos embutidos, transdutores externos, pistão e Área utilizada para análise de imagens digitais (DIC). (WOLF et al., 2015, p164).

A figura 3 ilustra a viga de concreto utilizada para testar a sensibilidade dos sensores ultrassônicos para detectar as fissuras crescentes no interior do concreto. Dois sensores ultrassônicos são instalados a uma distância 0,3m dos bordos longitudinais, 12 sensores de emissão acústica (EA) posicionados por tabela de coordenadas, 3 transdutores de deslocamento e uma área de 0,30m² centrada no ponto de iniciação da carga para avaliação da imagem digital. Após a posição dos sensores, armaduras e reforço na viga o concreto foi projetado e após a cura foi ensaiado no teste de flexão de tres pontos (WOLF *et al.* 2015).

Através de ensaios foi possível analisar a eficácia dos sensores ultrassônicos no monitoramento, sua sensibilidade para monitorar alterações profundas dentro de um elemento de concreto maciço vai depender dos parâmetros de sinal analisados e, portanto, do método de análise utilizado. Enquanto o tempo de viagem muda quando a rachadura cruza o caminho da onda direta, outros aspectos dos sinais ultra-sônicos são mais sensíveis a mudanças (WOLF *et al.* 2015).

Wolf *et al.* (2015) observaram que o método de correlação dos sensores ultrassônicos, avalia as mudanças dentro de todo o sinal. Analisar a amplitude dos sinais ultra-sônicos transmitidos leva a uma detecção precoce de uma rachadura de quebra de superfície antes de atravessar o caminho de onda direta e antes que a rachadura alcance uma largura perigosa para a saúde estrutural da estrutura.

Os resultados apresentados também indicaram que o método de emissão acústica é o método mais sensível para detectar alterações no concreto, pois registra e localiza o desenvolvimento de micro fissuras no material. A imagem digital é muito sensível às deformações superficiais causadas pela flexão dos feixes sob carga e a deformação causada pela flexão no modelo pode ser detectada com os transdutores de deslocamento (WOLF *et al.* 2015).

A técnica descrita neste artigo tem o potencial para ser usada em estruturas de engenharia, como pontes, em particular, quando os sensores externos já conhecidos nesse setor são difíceis de aplicar (WOLF *et al.* 2015).

Zhao *et al.* (2015) incorporou fibra ótica na mistura de concreto e a partir de sensores especiais coladas nas superfícies inferiores das vigas foi avaliada a perda de intensidade de luz com a largura de fendas.

Na fig. 2 apresenta o diagrama esquemático com duas placas de plexiglass sendo uma fixa e outra móvel, entre elas uma lacuna como rachadura. A fibra ótica é colada na superfície das duas placas atravessando a fenda, quando a rachadura torna-se maior a fibra intersecta a fenda que tem que ser dobrada para permanecer contínua, formando duas micro-curvas. A curva é monitorizada por uma potência óptica. Assim, com base na alteração da perda de flexão, o aumento da fissura é continuamente monitorizado. (ZHAO *et al.* 2015).

A partir do diagrama esquemático foi realizado o experimento na estrutura de concreto conforme figura 3 ajustando o ângulo entre as fibras e a fissura no concreto em 30°, 45° e 60°.

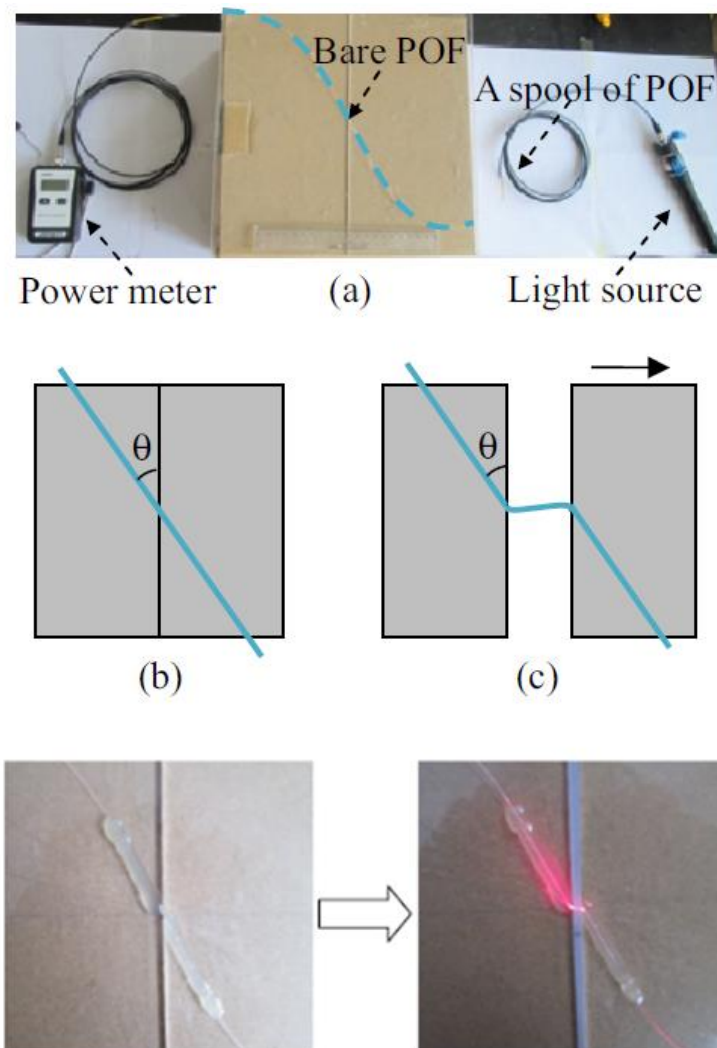


Figura 4- Diagrama esquemático do dispositivo de detecção. (ZHAO *et al.*, 2015, p. 72)

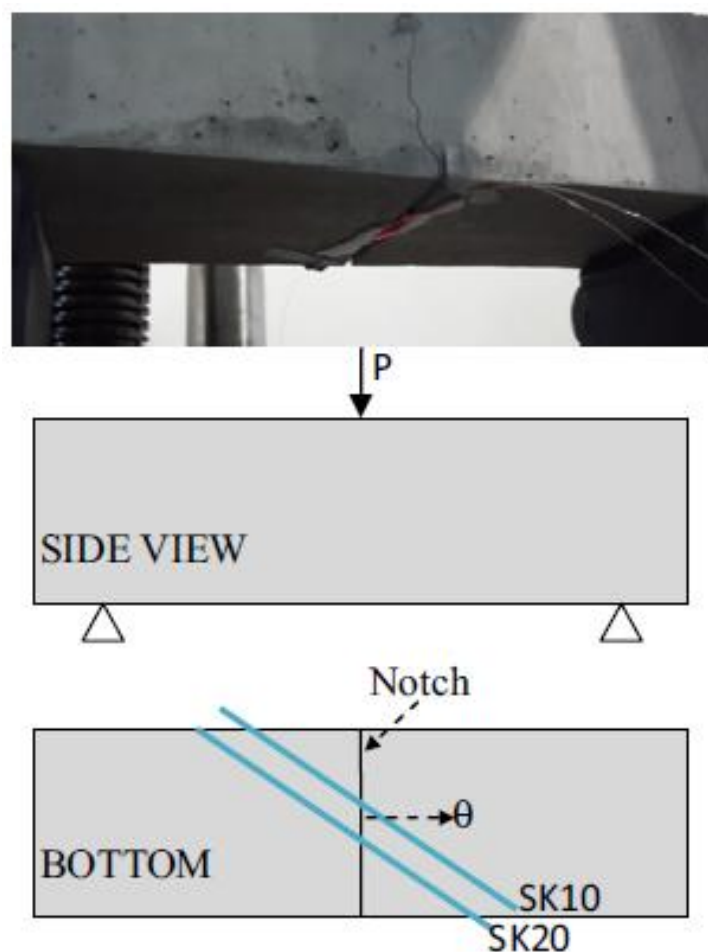


Figura 5 - Montagem teste para vigas concreto. (ZHAO et al., 2015, p. 73)

Os resultados do estudo demonstraram que o uso de fibra ótica para o monitoramento das fissuras é viável. A perda de intensidade de luz da fibra ótica demonstrou-se proporcional com o aumento da largura das fissuras, o que significa que a fibra tem boa percepção inicial das rachaduras, podendo chegar a uma faixa de monitoramento de 7,8mm. Essa capacidade ultrapassa fibras já utilizadas como as fibras de sílica.

Degala *et al.*, 2009 apresentam um estudo de emissão acústica (AE) realizado durante testes laboratoriais de amostras de lajes de concreto reforçadas com tiras de fibra de carbono (CFRP), estudando a viabilidade da AE para monitorar o início, a progressão e a localização de fissuras na estrutura.

Para esse estudo Degala *et al.* (2009) analisaram quatro placas distintas utilizando três abordagens: análise de parâmetros, intensidade analítica e análise de componentes principais, para prever e caracterizar o modo de falha.

A figura 6 demonstra o método experimental das placas analisadas. Foram executadas lajes de tamanhos padronizados, com o reforço executado conforme figura 6a, as tiras de CFRP foram coladas no concreto com adesivo estrutural adequado (fig.6b), as barras de reforço selecionadas foram instrumentadas com medidores de deformação. Cada placa foi testada a resistência a flexão de quatro pontos em um simples vão de 1220 mm com 152 mm de região de momento constante e dois intervalos de cisalhamento de 533 mm. Sensores EA foram anexados a uma única tira de CFRP a cerca de 203 mm de qualquer extremidade da laje (Fig. 6c) usando cola de fusão a quente.

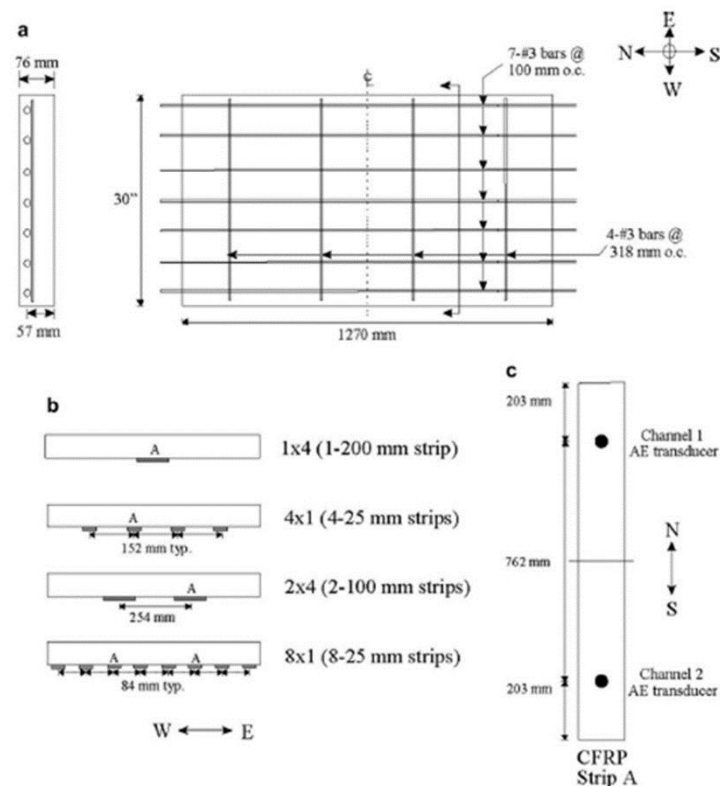


Figura 6 - Laje de concreto reforçado com CFRP. (A) Detalhes do reforço de aço. (B) Detalhes da viga de CFRP monitorada com AE. (C) Posicionamento dos sensores de AE (DEGALA et al. 2009, pág 2018).

Os resultados apresentados demonstrou que a energia acumulada correlaciona-se bem com o grau de dano sofrido no concreto, o que já era de se esperar segundo Degala *et al.* (2009). A EA possui viabilidade para monitoramento de reforços estruturais em tempo real, em que análises mais precisas dos dados identificam diferentes fontes de dano (fissuras no concreto e descolamento das fibras por exemplo) principalmente no aumento no número de sensores.

Bernstone & Heyden (2009) aprofundaram os estudos no método HA (Heyden/Austrell) de técnica de análise de imagem digital para monitoramento de fissuras, com o objetivo de desenvolver uma ferramenta de câmera de rede digital econômica (câmera web padrão), juntamente com uma técnica de análise de imagem de fácil manuseio, a fim de adquirir conjuntos de dados contínuos sobre o desenvolvimento de fissuras em barragens de concreto, aplicando os conceitos em campo (figura 7).

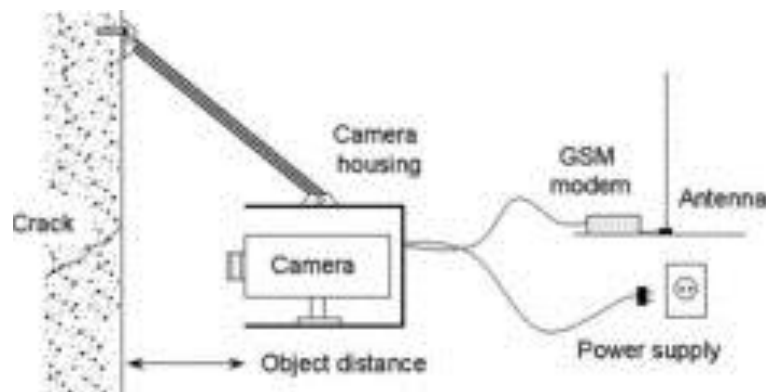


Figura 7 - Esboço do esquema do sistema de monitoramento de fissuras sistema. (BERNSTONE & HEYDEN, 2009, pág 885).

O método baseia-se no não-contato robusto e direto para a análise de deformação experimental. Permite a medição de suspeitas fissuras, sem aplicação de sensores, identificadas a partir de inspeções, através de uma seqüência de imagens capturadas em intervalos. Os deslocamentos de abertura de fissuras na superfície dos objetos investigados (figura 8) são obtidos por um algoritmo que permite rastrear automaticamente os movimentos de marcadores discretos pintados (BERNSTONE & HEYDEN, 2009).

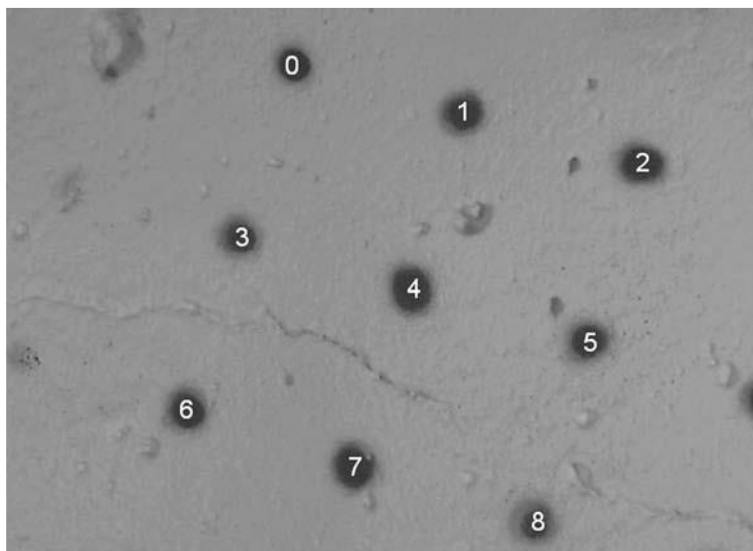


Figura 8 - Rastreamento aplicado a uma região de concreto rachado. (BERNSTONE & HEYDEN, 2009, pág 890).

Os resultados apresentados por Bernstone & Heyden (2009), sugerem a viabilidade da técnica para a barragens e aplicações em estruturas de concreto, permitindo a medida de forma automatizada das fissuras no concreto em imagens digitais sem perder a resolução.

Chen & Liu (2008), propuseram o monitoramento por medidas de resistência elétrica de fissuras em concretos reforçados com fibras de carbono sob compressão uniaxial e flexão, utilizando a técnica de monitoramento por emissão acústica para verificar a confiabilidade da medição da resistência.

Para o ensaio de resistência à compressão, mediu-se a resistência elétrica no eixo de tensão utilizando o método de quatro sondas, em que a tinta de prata em conjunto com fios de cobre foram aplicados como contatos elétricos. O dispositivo foi conectado a um computador para gravação e processamento de dados. O tempo mínimo necessário para obter uma medição foi de 0,1 s (CHEN & LIU, 2008).

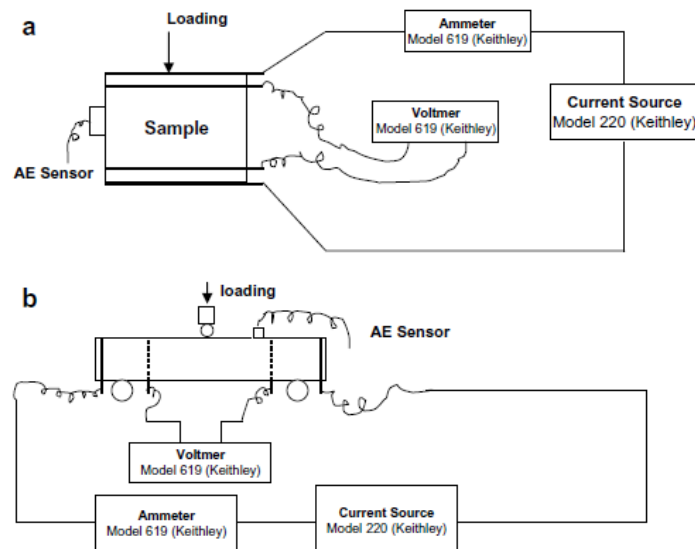


Figura 9 - Esquema das medições elétricas DC por técnica de quatro terminais: (a) para compressão uniaxial e (b) para flexão de três pontos de carga. (CHEN & LIU, 2008, pag 2197).

Os resultados mostraram que a medição da resistência elétrica é capaz de monitorar a evolução *in situ* de vários danos internos no concreto reforçado com fibra. Sob compressão uniaxial, a resistência elétrica inicial dos corpos de prova diminuíram com o aumento da carga. Quando a carga atingiu 60% (isto é, danos significativos ocorridos nos corpos de provas), a resistência aumentou bruscamente (CHEN & LIU, 2008).

Chen & Liu (2008), concluíram que as fissuras na microestrutura pode ser monitorada através da medição da mudança relativa da resistência elétrica sob dobramento de três pontos. A comparação da análise entre a medida da resistência elétrica e a técnica de emissão acústica indicou que essas duas técnicas são complementares para monitorar danos no concreto reforçado com fibras de carbono.

Orlowski & Lacerda (2003), apresentaram um estudo de caso sobre o monitoramento das fissuras e trincas presentes na casa de força da UHE Mascarenhas, realizado durante 04 meses no ano de 2001. As análises das leituras e um modelo numérico simplificado foi aplicado à estrutura da casa de força com o intuito de confirmar a manifestação da reação álcali-agregado (RAA).

A metodologia proposta para avaliação das trincas, consistiram basicamente no monitoramento por meio da instalação de protótipos de medidores de fissuras

de leitura manual desenvolvidos pelo próprio instituto, e a utilização de instrumento automatizado de fissuras e de modelagem matemática para os estudos das causas das patologias (ORLOWSKI & LACERDA, 2003).

Na análise dos resultados Orłowski & Lacerda (2003), concluíram que os deslocamentos dos medidores triortogonais revelaram a ocorrência de deslizamento horizontais e recalques diferenciais o que tornou possível a ocorrência de RAA nas estruturas estudadas, e a pequena variação dos medidores de fissuras, até 0,02 mm, o que revela, que não está havendo tendência de propagação das fissuras.

Na conclusão do estudo demonstrou que a instrumentação implantada possui eficácia, porém precisar ser acompanhada por um período maior, recebendo ainda as complementações da automação e de instrumentos adequados para acompanhar a RAA, como por exemplo o extensômetro múltiplo (ORLOWSKI & LACERDA, 2003). Os autores ainda pontuaram a importância de se utilizar instrumentos automatizados e manuais, aliando a rapidez e precisão com a simplicidade, além do serviço manual permitir que haja sempre a inspeção visual das estruturas ao serem estas percorridas quando estão sendo realizadas as leituras.

2.1. NORMATIZAÇÃO CONCRETO ARMADO: FISSURAS

A associação brasileira de normas técnicas (ABNT) aponta limites para aberturas de fissuras em estruturas de concreto armado segundo a NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.

De acordo com a norma NBR 6118:2014 os elementos estruturais de concreto armado inevitavelmente sofrem fissurações de diversas origens devido à grande variabilidade e à baixa resistência do concreto a tração. No entanto buscase controlar a abertura das fissuras visando a proteção das armaduras quanto a corrosão e a aceitabilidade sensorial dos usuários.

Na tabela 2, adaptada da norma em vigor, são apontados os valores limites da abertura das fissuras (w_k), em função das classes de agressividade ambiental, visando garantir a durabilidade adequada das armaduras quanto a corrosão.

Entretanto, na prática, as fissuras podem eventualmente ultrapassar esses limites principalmente devido à alta variabilidade das grandezas envolvidas.

Tabela 2 - Exigências relativas a fissuração em relação ao tipo de concreto e classe de agressividade ambiental (Acervo pessoal)

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental	Exigências relativas a fissuração
Concreto simples	CAA I ou CAA IV	Não há
Concreto armado	CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,4 \text{ mm}$
	CAA II ou CAA III	ELS-W $w_k \leq 0,3 \text{ mm}$
	CAA IV	ELS-W $w_k \leq 0,2 \text{ mm}$
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré tração: CAA I	ELS-W $w_k \leq 0,2 \text{ mm}$
	Pós tração: CAA I e CAA II	
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré tração: CAA II	ELS-F/ ELS-D
	Pós tração: CAA III e CAA IV	
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré tração: CAA III e CAA IV	ELS-F/ ELS-D

1. As definições dos estados limite de formação de fissuras ELS-W/ ELS-F/ ELS-D estão no item 3.2 da NBR 6118:2014.

2. As definições das classes ambientais estão na NBR 12655:2015

Observa-se na tabela 2 que a abertura máxima característica das fissuras vão da ordem de 0,2mm a 0,4mm. Nas armaduras ativas que podem sofrer corrosão sob tensão esses limites de extrema importância, o que torna-se insignificativa na corrosão das armaduras passivas.

Segundo a norma NBR 6118:2014 as fissuras que afetarem a funcionalidade da estrutura como na ocorrência de vazamentos por exemplo, ou na questão de aceitabilidade sensorial do usuário, causando desconforto psicológico, podem ser adotados limites mais severos.

Em geral a presença das fissuras com aberturas que respeitam os limites apresentados na tabela 2 em estruturas bem projetadas e construídas, não implicam em perda de durabilidade ou perda de segurança quanto aos estados limites últimos (ABNT NBR 6118:2014).

3. MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Neste capítulo será apresentado a definição de manifestação patológica na visão dos principais estudiosos nessa área, buscando conceitos e expondo as formas de maior ocorrência, dando-se ênfase as fissuras em superfícies de concreto que é o objetivo principal desse projeto de pesquisa.

3.1. PRINCIPAIS FORMAS DE OCORRÊNCIA DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil através de décadas vem aprimorando e acelerando sua forma de atuação, buscando cada vez mais sistemas construtivos econômicos e racionais, priorizando a construção em série, rápida e enxuta.

Segundo autores como Souza & Ripper (1998), as patologias nas construções vêm sendo causadas por impactos desse ritmo acelerado, que podem vir a ser provocadas por falhas nos diversos setores que engloba.

O conceito de patologia da edificação pode ser interpretado por diversos estudiosos dessa área. Thomaz (2001) e Marcelli (2007) definem como um estudo das manifestações patológicas que se apresentam nas edificações seja provocado por falhas nos processos de projeto, execução ou manutenção.

Souza & Ripper (1998) foram mais além e abordam como um novo campo que se ocupa do estudo das origens, formas de manifestações, consequências e mecanismos de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas. Já segundo Marcelli (2007) as manifestações patológicas podem aparecer na edificação em todos os seus processos de construção. Quanto mais cedo for detectada, torna-se mais fácil corrigi-la e saná-la. As falhas podem ser causadas por diversos setores ligados diretamente a construção.

Diversas formas de manifestações patológicas estão sendo estudadas a fim de prevenir sua formação, elas aparecem desde a fundação ao acabamento final do edifício e podem prejudicar a edificação de forma passiva ou a sua total destruição (SOUZA & RIPPER, 1998).

De acordo com Thomaz (2001), os construtores devem ficar atentos ao surgimento das manifestações patológicas nos elementos de fundação, estruturas de concreto armado e alvenarias de vedação.

3.1.1. Fundações

A base da edificação são as fundações, e segundo estudos apresentados por Thomaz (2001) os recalques são as patologias mais recorrentes nessa área, e podem acarretar diversos outros vícios como fissuras, infiltrações e até mesmo o desmoronamento da edificação.

Segundo Oliveira (2012) define-se recalque como sendo o deslocamento vertical para baixo sofrido pela base da fundação em relação à superfície do terreno. Resultante da deformação do solo proveniente da aplicação de cargas ou devido ao peso próprio das camadas sobre a qual se apoia o elemento da fundação.

Os recalques podem surgir por diversos motivos, sendo recorrentes os caracterizados em: a) recalque diferencial da fundação - quando ocorre o rebaixamento do solo apenas sob uma parte da estrutura da edificação; b) recalque de fundações por superposição de pressões - quando ocorre a sobreposição de pressão no solo de duas cargas distintas; c) recalque por erro no projeto e d) recalque por erro na execução (THOMAZ, 2001).

3.1.2. Estruturas em concreto

Segundo Thomaz (2001), as estruturas junto às fundações formam os elementos essenciais para a sustentação da edificação. Nas estruturas em concreto, a manifestação patológica predominante é a corrosão das armaduras. A presença da corrosão é visualizada no aparecimento geralmente de manchas avermelhadas e fissuras no concreto.

A durabilidade do concreto fissurado, interna e externamente, pode vir a perder grande velocidade, dependendo do tipo de exposição do elemento estrutural, das condições ambientais, da ação de águas agressivas (que penetram

pelas fissuras e poros) e do contato das armaduras com o ar. (SOUZA & RIPPER, 1998).

Das causas mais conhecidas para o surgimento da corrosão destaca-se a insuficiência ou má qualidade do concreto do recobrimento da armadura. Além das causas pontuais, existem casos cada vez mais generalizados, devido à modernidade na construção com a aplicação de estruturas mais flexíveis e com a velocidade da construção (THOMAZ, 2001).

3.1.3. Alvenarias de vedação

De fato, o conhecimento da posição, tipo, disposição e movimentação da fissura na parede podem auxiliar na análise da estabilidade do elemento parede, na verificação da sua interação com o revestimento, na determinação da origem provável e principalmente, se é possível intervir no problema. (LORDSLEEM JR, 1997, p.72).

Olivari (2003) ressalta que uma manifestação patológica pode ser causadora de diversas outras, que podem aparecer da mesma forma. O importante é buscar informações sobre a edificação, entorno e modificações que possam estar intervindo para o surgimento do vício, a fim de saná-las pela sua origem.

3.2. FISSURAS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Das diversas manifestações patológicas que podem aparecer em estruturas de concreto as fissuras surgem como as mais características, por apresentarem um aspecto antiestético traz a sensação de pouca estabilidade, apresentando perigo a estrutura devido decorrerem a corrosão da armadura, e a penetração de agentes agressivos externo para dentro do concreto (SOUZA & RIPPER, 1998).

O concreto por ser um material com baixa resistência a tração, fissurará por natureza, dessa forma é importante caracterizar a fissura de acordo com sua origem, intensidade e magnitude. As causas podem ser as mais diversas,

intrínsecas ou extrínsecas, e é necessário análises consistentes da fissura como sua abertura, extensão e profundidade (THOMAZ, 2001).

Segundo Bauer (2015) as fissuras podem surgir em etapas distintas no concreto, após anos, semanas ou até em poucas horas após a concretagem. E se classificam principalmente de acordo com a movimentação, podendo ser ativa ou viva, quando a causa responsável por sua geração ainda atua sobre a estrutura, ou, inativa ou estável, quando sua causa deixou de existir.

Embora a palavra fissura tenha sido empregada para representa qualquer tipo de abertura na estrutura, a mesma pode ser classificada e denominada conforme tabela 3.

Tabela 3 – Classificação das fissuras conforme espessura (OLIVARI, 2003, pág 30)

Denominação	Abertura da fissura
Fissura capilar	< de 0.2mm
Fissura	De 0.2mm a 0.5mm
Trinca	De 0.5mm a 1.5mm
Rachadura	De 1.5mm a 5.0mm
Fenda	De 5.0mm a 10.0mm
Brecha	> de 10.0mm

Das diversas causas de ocorrências das fissuras Souza & Ripper (1998) dissertaram alguns itens sobre as configurações das fissuras em função do que possam motivar o surgimento de tensões e a geração de quadros fissuratórios conforme segue:

- Deficiência de projeto
- Contração plástica do concreto
- Perda de aderência
- Retração do concreto
- Reações expansivas
- Corrosão das armaduras
- Recalques diferenciais
- Variação de temperatura

3.2.1. Deficiência de projeto:

Configura as falhas de projetos estruturais em função do tipo de esforço a que estão submetidas as peças estruturais. Nas vigas a ocorrência de fissuras podem surgir nas quatro fases em função dos esforços que sofre conforme figura 10.

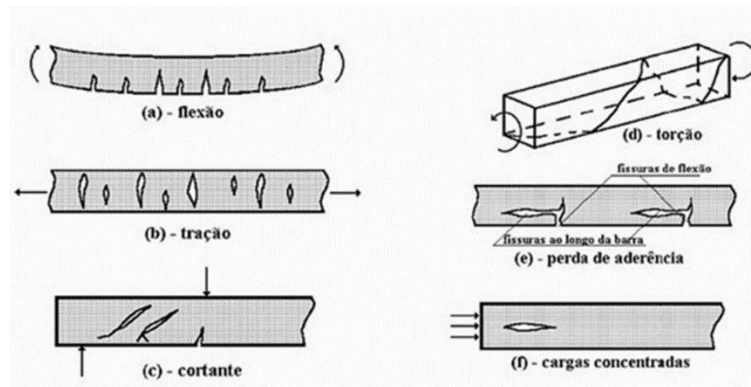
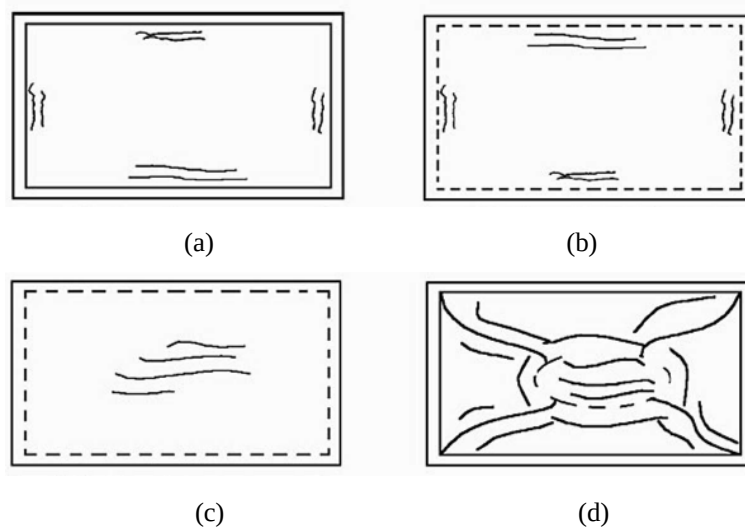


Figura 10- Fissuras em função do tipo de solicitação predominante (SOUZA & RIPPER, 1998, pág 58).

É também de grande importância as análises das fissuras em casos de deficiência de capacidade resistente em lajes que podem sofrer devido a sua espessura, ou por exemplo, na ausência de armadura (figura 11).



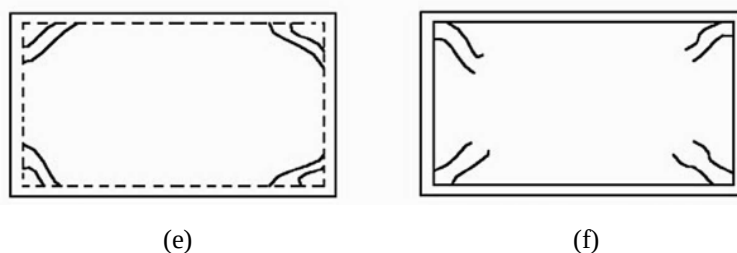


Figura 11 - Surgimento de fissuras em lajes. Fissuração por esmagamento do concreto, por reduzida espessura da laje – momento negativo(a). Fissuração de flexão, devida insuficiência de armadura para os momentos negativos (b). Fissuração por esmagamento do concreto devido a reduzida espessura da laje – momento positivo (c). Fissuração por flexão, devida a insuficiência de armadura para os momentos positivos (d). Fissuração por deficiência de armadura para combate de momentos volventes superior (e) Inferior (f) (SOUZA & RIPPER, 1998, pág 60).

3.2.2. Contração plástica do concreto

Ocorre ainda antes da “pega” do concreto devido a evaporação acelerada da água que foi utilizada em excesso na execução, em que a massa se contrai de forma irreversível imediatamente após o lançamento do concreto. Esse tipo de fissuramento pode ocorrer com mais frequência em superfícies extensas de lajes e paredes, sendo as fissuras superficiais, paralelas entre si, em ângulo de 45° com os cantos (Souza & Ripper, 1998).

3.2.3. Perda de aderência

No movimento natural de assentamento do concreto podem ocorrer perda de aderência do concreto com a armadura (figura 12), ocasionado o surgimento de fissuras que acompanham o desenvolvimento das armaduras e provocam o efeito parede, ou sombra (Souza & Ripper, 1998).

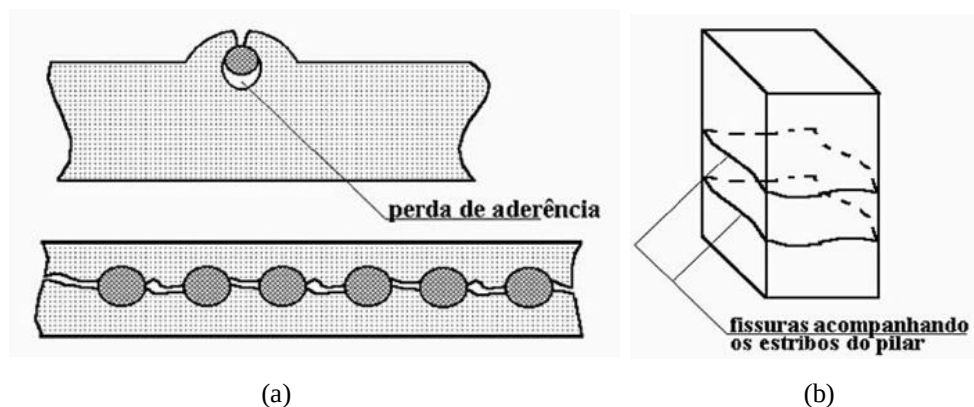


Figura 12 - Formação de fissuras por assentamento plástico do concreto (a). Fissuras por assentamento plástico em pilares acompanhando os estribos (b). (SOUZA & RIPPER, 1998, pág 62).

3.2.4. Retração do concreto

A retração do concreto é um comportamento reológico natural de movimento da massa, que deve ser considerado nos níveis de projeto a execução, caso não for considerado as possibilidades de fissuração, podendo levar a formação de trincas que seccionem completamente as peças mais esbeltas, são grandes. É importante a atenção nas análises das tensões de retração, da disposição das armaduras de pele e da interação da estrutura com o meio ambiente (Souza & Ripper, 1998).

As configurações típicas das fissuras de retração aparecem no caso das vigas, no contorno da alma das mesmas, de forma paralela entre si e em intervalos regulares (figura 13a). Já nas lajes as fissuras aparecem em forma de mosaicos, podendo surgir em ambas as faces da peça (figura 13b).

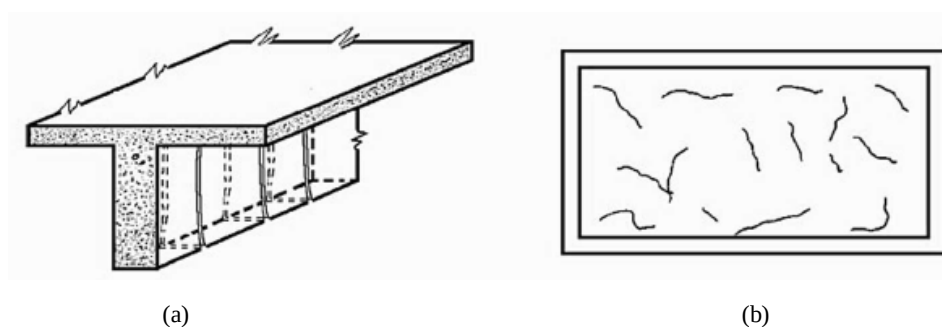


Figura 13 - Fissuras de retração em vigas (A). Em lajes (B). (SOUZA & RIPPER, 1998, pág 64).

3.2.5. Reações expansivas

A reação álcalis-agregado, ocorre basicamente entre os álcalis do cimento, agregados contendo sílica amorfa e carbonatos, ocasionando a formação de um gel expansivo dentro da massa de concreto, que se desenvolve lentamente, podendo levar vários anos para surgir (OLIVARI, 2003).

Configura-se a fissuração em forma de mosaico paralela à superfície, devido a (figura 14) (SOUZA & RIPPER, 1998).

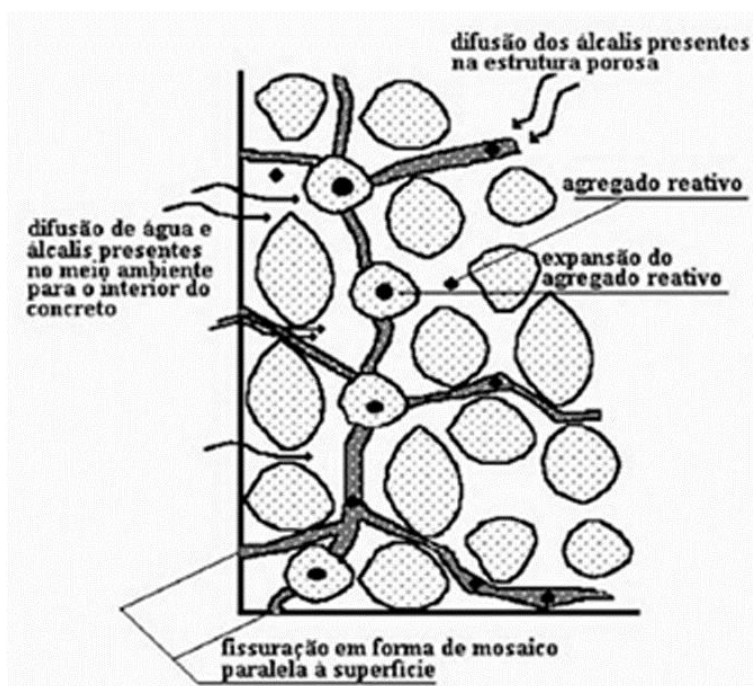


Figura 14 - Formação da reação alcali-agregado dentro do concreto. (SOUZA & RIPPER, 1998, pág 65).

3.2.6. Corrosão das armaduras

A corrosão das armaduras na estrutura de concreto armado é caracterizada pela destruição da película passivante existente ao redor de toda a barra, formada como resultado do impedimento da dissolução do ferro pela elevada alcalinidade da solução aquosa que existe no concreto (SOUZA & RIPPER, 1998). A fissura são causadas nesse caso por tensões de tração simples no concreto, em consequência da expansão da armadura provocada pela corrosão (OLIVARI, 2003).

De acordo com Souza & Ripper (1998), no interior do concreto o pH do meio aquoso é bastante alcalino (entre 12.6 e 14), como resultado da própria reação entre a água e os sais minerais que compõem o cimento. Dessa forma se mantido o nível de alcalinidade no interior do concreto estará garantida a criação da já referida película passivante, pelo contato entre a ferrugem superficial das barras e a água.

A destruição da camada óxida de revestimento protetor das barras, ocasionando a corrosão podem ocorrer nas configurações que segue, ilustrada pela figura 15:

- Corrosão por tensão fraturante: ocorre em aços submetidos a grandes esforços mecânicos (protensão) e que, em presença de meio agressivo, podem sofrer fratura frágil;
- Corrosão pela presença de hidrogênio atômico, que fragiliza e fratura os aços;
- Corrosão por pite: que pode ser localizada, caracterizada pela ação de íons agressivos (cloretos, em especial), sempre na presença de umidade e oxigênio; ou generalizada (carbonatação), função da redução do pH do concreto para valores inferiores a 9, por presença de CO₂ transportado por meio aquoso através dos poros e fissuras do concreto.

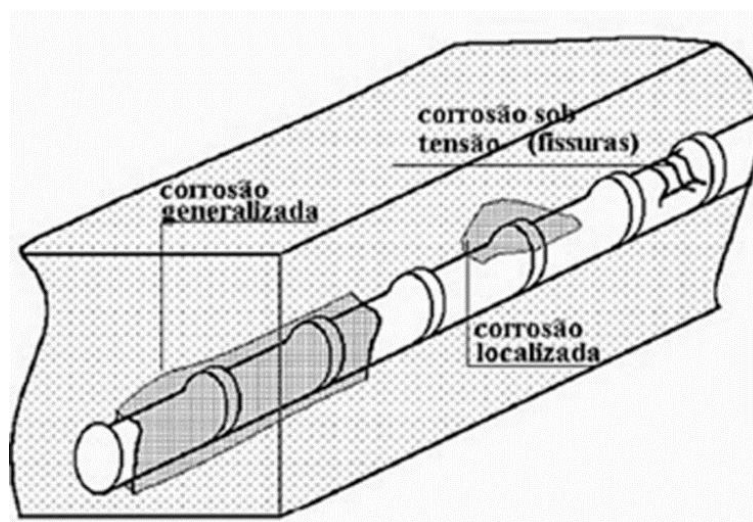


Figura 15 - Tipos de corrosão (SOUZA & RIPPER, 1998, pág 66).

3.2.7. Recalques diferenciais

Os recalques diferenciais já conceituado anteriormente podem gerar um quadro de fissuramento pela falha de um ou mais apoios de uma determinada estrutura em que a mesma não conseguiu assimilá-lo, devido a instauração de diferentes estados de tensão em diferentes seções de uma mesma peça estrutural (OLIVARI, 2003).

De uma maneira geral, não é só a estrutura a ressentir-se deste efeito, mas também, no caso de edifícios, por exemplo, as alvenarias e os caixilhos (SOUZA & RIPPER, 1998).

As fissuras causadas pelos recalques diferenciais são geralmente inclinadas indo à direção do ponto de maior recalque e são provocadas pelas tensões de cisalhamento (OLIVARI, 2003).

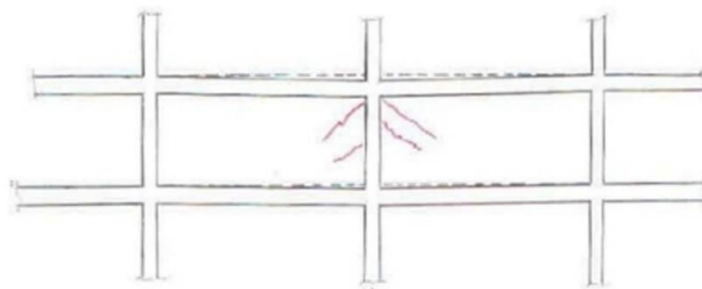


Figura 16 - Fissura de recalque. OLIVARI, 2003, pag 10)

3.2.8. Variação de temperatura

As fissurações também podem surgir em situações de sobre tensão gerado por contração ou dilatação térmica, onde criam-se tensões superiores à capacidade resistente ou de deformação das peças (OLIVARI, 2003).

Souza & Ripper (1998) e Olivari (2003), exemplificam uma situação típica que ocorre nas coberturas, principalmente as horizontais, muito mais expostas aos gradientes térmicos naturais, e em consequência a movimentos diferenciados que, normalmente, resultam em fissuração, agravada no caso de diferença de inércia (encontro lajes-vigas) ou de materiais resistentes (lajes mistas ou pré fabricadas)

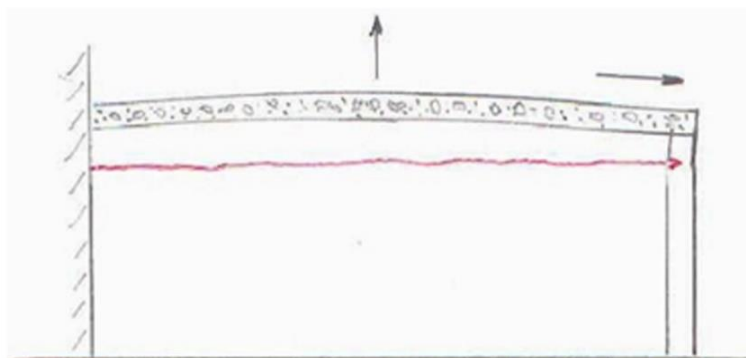


Figura 17 - Fissura de movimentação térmica. (THOMAZ, 1989 apud OLIVARI, 2003, pág. 11).

Outras causas de ocorrências das fissuras podem ser expostas como ações aplicadas localmente, má execução das formas e deficiência na execução.

4. MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS PARA O CONTROLE DE FISSURAS NA ESTRUTURA DE CONCRETO

Em conjunto serão abordados as ferramentas utilizadas para monitoramento das fissuras, o método de inspeção e o método de avaliação empregado.

Os métodos não-destrutivos segundo Bungey *et al.*, (2006) são geralmente definidos como não prejudiciais ao desempenho do elemento sob ensaio. Podendo apresentar-se também como parcialmente destrutivos caso tenham que danificar algu zona superficial do elemento. Todos os métodos não-destrutivos podem ser diretamente no concreto sem remoção de uma amostra, e caso ocorra a necessidade, a remoção de acabamentos de superfície pode ser efetuada.

Dos métodos mais convencionais e práticos estão listados o controle de fissura pelo método de selos de gesso ou de vidro e o monitoramento através do fissurometro. Outros métodos exigem ferramentas mais elaboradas como o paquímetro, sensores de deslocamento e aparelhos de emissão acústica, a escolha do método irá depender de fatores como custo, acesso e precisão.

4.1. SELOS DE GESSO OU DE VIDRO

O processo para analisar se uma fissura está ativa, ou seja, continua aumentando seu espaçamento, ou não, pode proceder-se da instalação de uma placa de gesso ou de vidro sobre a fissura (figura 18)

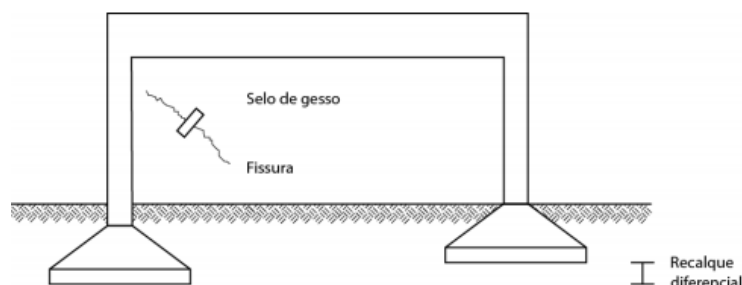


Figura 18 - Controle fissura com selo de gesso. (SANTOS, 2014, pag 73).

O monitoramento inicia-se após a colocação do selo, em que periodicamente, de preferência em horários próximos, durante cerca de três meses, anota-se a data e observa-se a condição da placa. O selo pode se romper antes desse prazo, situação onde é anotada a data e aplicado outro selo. Se o selo romper antes do período de tempo observado para a primeira ruptura, há indícios de que manifestação que está provocando a fissura não se estabilizou e pode estar se acelerando (REBELLO, 2008).

Este método apesar da facilidade de aplicação não permite a automação no processo, sendo necessária o monitoramento presencial contínuo, o que impossibilita o uso em locais de difícil acesso.

4.2. FISSUROMETRO

O processo de monitoramento da fissura pelo fissurometro é iniciado na vistoria da estrutura em diversos períodos do dia para identificar possíveis alterações na fissura identificada, na leitura da abertura da fissura observa-se no instrumento o traço da medida e o valor da escala em milímetros que corresponde a fissura (MARTINS & JUNIOR, 2011).

A ferramenta nada mais é do que um modelo de régua com escalas distintas capaz de averiguar com maior precisão a medida da fissura (figura 19).



Figura 19 - Imagem de um modelo de fissurometro. (MARTINS & JUNIOR, 2011, pag 219)

Com esse ferramenta, segundo Alonso (1991), é possível realizar o controle na extensão da fissura, traçando-se um sistema de eixos ortogonais que

ultrapassem a fissura nos dois sentidos com auxílio de um lápis. Esse procedimento deve ser repetido periodicamente, anotando-se a data, as distâncias horizontais e verticais da origem do eixo até a fissura e, em seguida, mede-se a abertura da fissura (figura 20).

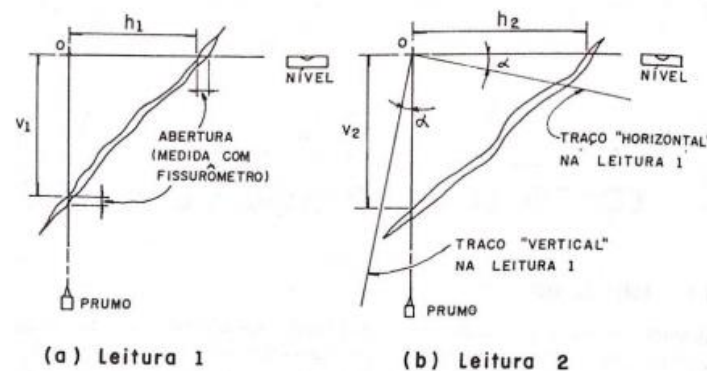


Figura 20 - Controle de fissura pelo fissurômetro. (ALONSO, 1991 apud SANTOS, 2014, pág. 73)

Assim como o método da placa de gesso e vidro, o fissurometro não permite a automação no processo, sendo necessária o monitoramento presencial contínuo, o que impossibilita o uso em locais de difícil acesso.

4.3. EMISSÃO ACÚSTICA

O método de emissão acústica (EA) analisa os ruídos criados quando os materiais se deformam ou rompem, dessa forma cada evento da emissão acústica é uma assinatura de um mecanismo real, um evento específico que reflete uma determinada resposta de um material (MEHTA & MONTEIRO, 2008)

Conforme figura 21, as ondas que se propagam através do material analisado são detectadas na superfície por um sensor, que irá transformar as vibrações em sinais elétricos.

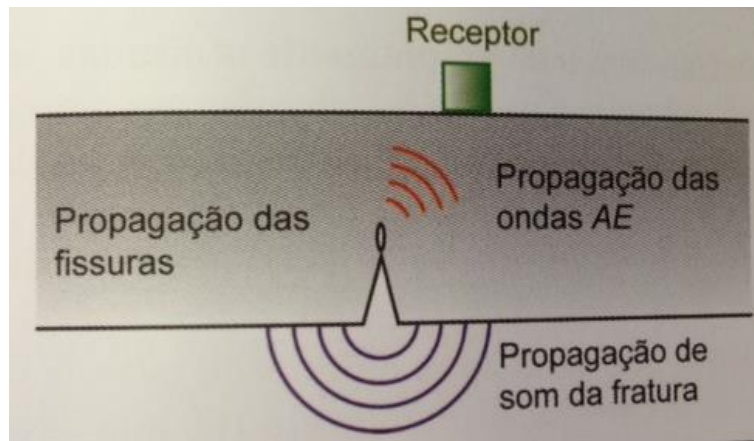


Figura 21 - Geração, propagação e detecção das emissões acústicas. (MEHTA & MONTEIRO, 2008. pág 421).

Nos materiais de alta atenuação, como o concreto, a emissão acústica gerada é descontínua, tendo a amplitude da onda rapidamente diminuída. Atualmente as técnicas de EA tem sido utilizadas para monitorar regiões de fissuras descontínua e fissuras contínuas, surgindo como uma técnica promissora para estudo de fraturas e monitoramento em concreto armado visando sua integridade (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Existem no mercado diversos tamanhos, formas, faixas de frequências e de temperatura, e tipos de embalagem para atender às mais variadas necessidades de aplicação e do meio ambiente (figura 22).



Figura 22 - Exemplos de sensores EA. (http://www.pasa.com.br/2016/produtos_sensores.asp)

4.4. LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMERS - LVDT

Existem diversas tecnologias possíveis para o uso de sensores de deslocamentos, uma das mais tradicionais é a que faz uso de um transformador diferencial, o LVDT (figura 23).

O sensor LVDT é um transdutor de deslocamento linear muito utilizado no setor industrial e recentemente utilizado em pesquisas para automação do monitoramento das fissuras. É um tipo comum de transdutor eletromecânico que pode converter o movimento retilíneo de um objeto ao qual é acoplado mecanicamente em um sinal elétrico correspondente.

Esses sensores estão prontamente disponíveis para medir movimentos tão pequenos quanto alguns milionésimos de uma polegada até vários centímetros.

Basicamente um LVDT constitui de uma armadura tubular separada de material magneticamente permeável. Isto é chamado de núcleo, que é livre para se mover axialmente dentro do furo oco da bobina, e acoplado mecanicamente ao objeto cuja posição está sendo medida.

Em operação, o enrolamento primário do LVDT é energizado por corrente alternada de amplitude e frequência apropriadas, conhecida como excitação primária. O sinal de saída elétrica do LVDT é a tensão diferencial entre os dois enrolamentos secundários, que varia com a posição axial do núcleo dentro da bobina LVDT. Normalmente esta tensão de saída é convertida por circuitos eletrônicos adequados para alta tensão de nível ou corrente que é mais conveniente de usar.



Figura 23 - Imagem de uma modelo LVDT. (<http://www.rdpe.com/us/act.htm>)

Esses sensores embora apresentarem muitos estudos para sua aplicação possuem uma faixa de preço no mercado de R\$3.000,00 a R\$6.000,00, o que pode considerar um custo elevado para aplicação do monitoramento em determinadas estruturas convencionais.

4.5. IMAGEM DIGITAL

A técnica da análise digital de imagens, consiste na obtenção de medidas através de imagens fotográficas.

Robins *et al*, (2001) em seu estudo trouxe o termo *grid methods*, em que consistia na aplicação de uma grade de pontos ou linhas na superfície do elemento analisado, em que fotografa antes e durante a aplicação de uma força no elemento para analisar a distorção ocorrida.

Com os avanços da tecnologia integrou-se a imagem digital ao computador automatizando o processo, capturando a imagem e a distorção de forma digital. Com isso foi possível a análise de maiores deformações, a largura da fenda medida em maior precisão, análise toda automatizada e aumento da área analisada no elemento (ROBINS *et al.*, 2001).

Métodos estão sendo estudados para melhorias na implantação da imagem digital no monitoramento de fissuras. O estudo apresentado por Martins & Junior (2011) utilizou para leitura da fissura por imagem digital o método de processamento realizado no domínio espacial da imagem, agindo diretamente nos *pixels* da imagem. Determinando a imagem da fissura composta por níveis de cinza, como entrada do processamento digital.

Conforme figura 24 a leitura da imagem é realizada de forma a identificar os níveis de cinza de todos os pixels da imagem com a fissura, modificada para a escala de níveis de cinza que variam de intensidade 0 até 1, os novos valores dos pixels variam agora de valor 0 que representa o pixel preto, até o valor 1 que representa o pixel branco. A saída do processamento digital da imagem é o valor da quantidade de pixels da fissura. O sistema de inspeção proposto apresenta ao

usuário por meio da interface o resultado da comparação entre as imagens da mesma fissura em períodos diferentes (MARTINS & JUNIOR, 2011).

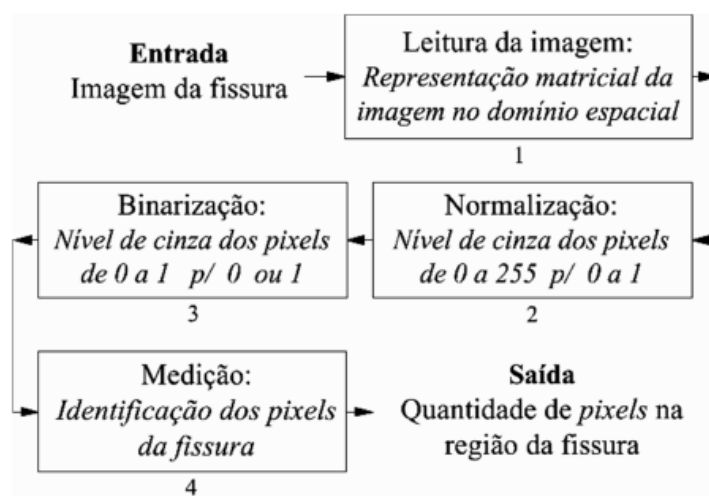


Figura 24 - Diagrama em blocos do algoritmo do processamento digital do sistema de visão computacional (MARTINS & JUNIOR, pag. 220, 2011).

No entanto esse tipo de método ainda requer um gasto alto com os equipamentos, devido a tecnologia empregada principalmente na resolução das imagens.

A tabela 4 traz um comparativo das ferramentas para os métodos não destrutivos apresentados, observa-se que as ferramentas de menor valor de mercado ainda possuem sistemas de monitoramento manual.

Tabela 4 - Comparativo dos métodos para ensaios não destrutivos (Acervo pessoal)

Ferramentas	Valor médio de mercado (R\$)			Monitoramento manual	Monitoramento contínuo (automatizado)
	Até 100	100 a 500	Acima de 500		
Selo de gesso	X			X	
Fissurômetro	X			X	
Paquímetro		X		X	
Sensores de EA			X		X
LVDT			X		X
Imagem digital			X		X

5. PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os procedimentos para realizar o experimento. Assim como, os métodos, equipamentos e materiais utilizados para posterior análise dos resultados de acordo com a revisão bibliográfica realizada.

Buscou-se como base criar um sistema de monitoramento da movimentação de aberturas em elementos de concreto, conforme diagrama de blocos ilustrado na figura 25.

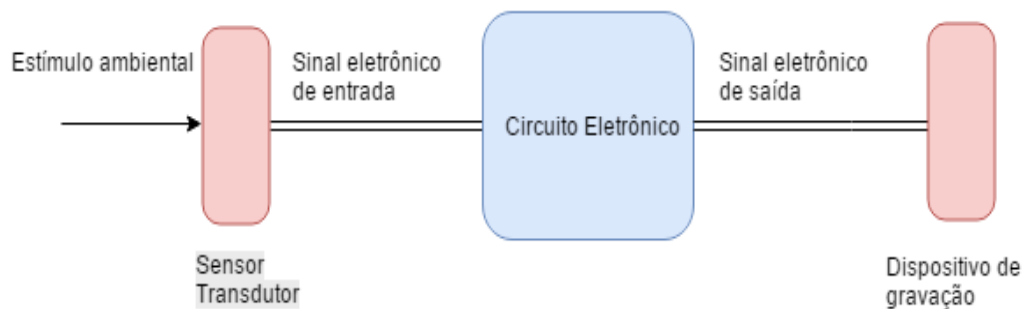
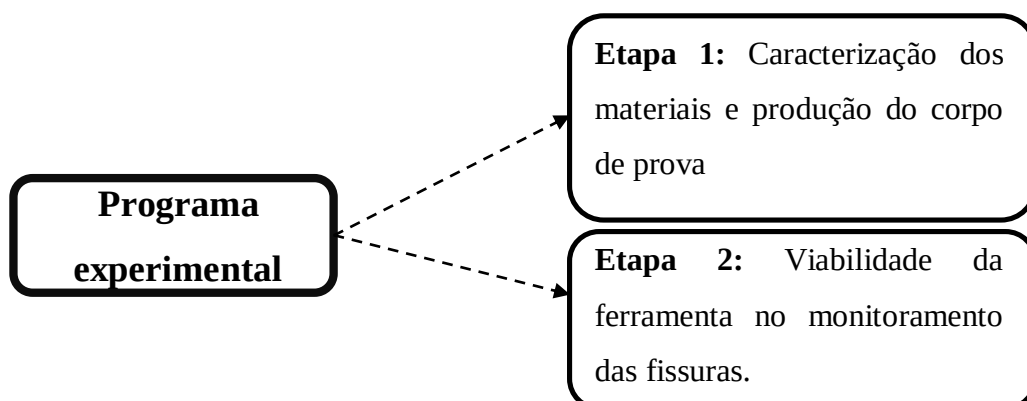


Figura 25 - Diagrama de Blocos do Sistema de Monitoramento. (Adaptado FERNANDEZ-CANQUE, 2017).

Em um sistema eletrônico, normalmente recebemos as quantidades físicas de um sinal de entrada usando alguma forma de sensor, transdutor ou atuador que gera um sinal elétrico correlacionado à entrada física. Da mesma forma, num sistema eletrônico a quantidade de saída é normalmente exibida por um sensor, transdutor, atuador ou monitor que é controlado pela saída eletrônica do sistema eletrônico (FERNANDEZ-CANQUE, 2017).

O programa experimental foi dividido em duas etapas conforme apresentado no diagrama a seguir.



A etapa 1 constitui na caracterização dos materiais, equipamentos e ferramentas. Avaliação dos graus de precisão, calibração e adequação ao ensaio. Em paralelo o corpo de prova em concreto desenvolvido.

A etapa 2 dá sequência com a elaboração do protótipo e análise da aplicação das ferramentas com testes de repetitividade para sua viabilidade.

5.1. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS

Os materiais, equipamentos e ferramentas utilizados para realização dessa pesquisa consistem na régua potenciométrica, paquímetro digital, placa de micro controlador e bloco em concreto.

5.1.1. Régua potenciométrica

A régua potenciométrica utilizada na pesquisa (figura 26) é um tipo de transdutor potenciométrico linear resistivo que pode ser aplicada como um sensor de posição. Este dispositivo apresenta um cursor que ao ser movimentado altera o valor de sua resistência, tal qual um potenciômetro.

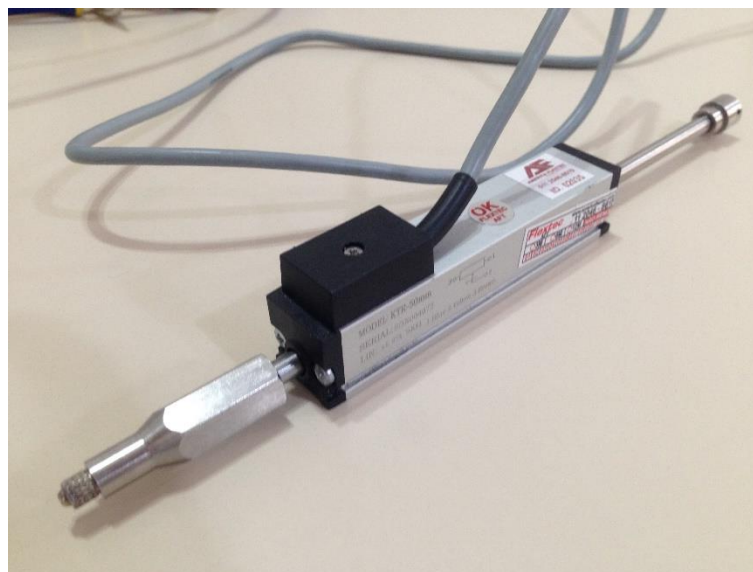


Figura 26 - Régua potenciométrica modelo KTR-50 (acervo pessoal).

Em eletrônica, segundo Dunn (2013), transdutor é um dispositivo que pode converter um sinal de uma forma física para um sinal correspondente de outra forma física. É utilizado em medições quando se pode correlacionar uma grandeza de saída com uma grandeza de entrada, no caso da régua potenciométrica, de forma linear.

De acordo com o mesmo autor, o conceito de sensor já se defini em um tipo de transdutor que pode fazer a leitura de determinada característica do ambiente, possuindo a capacidade de fornecer uma saída mensurável que varia em relação à amplitude da variável física.

Dentre as possíveis classificações para os diferentes tipos de sensores, temos a divisão entre sensores analógicos e digitais. Onde a diferença está no tipo de sinais em que estes se baseiam (DUNN, 2013).

Os sensores analógicos baseiam-se em sinais analógicos que proporcionam a variação de uma quantidade tal como tensão ou corrente, com o tempo, de uma forma contínua, mesmo que em intervalos limitados. Em contrapartida, os sensores digitais baseiam-se em dois níveis de tensão bem definidos, são sensores que utilizam a lógica binária (FERNANDEZ-CANQUE, 2017).

Uma outra forma de classificação dos sensores é quanto ao modo em que respondem às variações ambientais – na forma de uma propriedade elétrica. Assim, o transdutor linear resistivo é um sensor analógico que dentro de um circuito comporta-se como um resistor, mas que seu valor varia de acordo com uma propriedade do ambiente – no caso, o posicionamento relativo do cursor do aparelho.

O modelo utilizado nessa pesquisa foi um KTR-50 da America flextec, conforme informações do fornecedor, esse equipamento possui 0,01mm de repetibilidade, ou seja, sua margem de imprecisão na medida.

No mercado atual essa ferramenta possui baixo custo, possuindo em média, um preço de 500,00 reais, sendo de fácil manuseio e compatibilidade a *software*.

5.1.2. Paquímetro digital

O paquímetro digital é um instrumento usado na metrologia para medir pequenas peças, com rapidez, precisão e sem erro de paralaxe (figura 27).

No experimento o equipamento foi utilizado para leitura da medida da abertura em milímetros (mm), comparando com a medida do transdutor linear.



Figura 27 - Paquímetro Digital (acervo pessoal)

O modelo utilizado nessa pesquisa, conforme informações do fornecedor, possui 0,01mm de precisão. No mercado o paquímetro digital custa em média 80,00 reais, considerado um equipamento de baixo custo quando comprado com outros equipamentos de medição.

5.1.3. Placa de micro controlador

De acordo com Rafiquzzaman (2014), os sistemas digitais são projetados para armazenar, processar e comunicar informações em formato digital.

Um exemplo de sistema digital é o microcontrolador. Ainda segundo Rafiquzzaman (2014), microcontroladores típicos incluem um CPU (microcomputador), temporizadores e conversores A/D (analógico para digital) e D/A (digital para analógico), tudo em um único chip.

O microcontrolador utilizado neste experimento é o Arduino Uno (figura 28). Segundo McRoberts (2015) o Arduino é a plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software.



Figura 28 - Modelo de placa microcontroladora Arduino UNO (Acervo pessoal).

A programação do Arduino para execução das ações desejadas foi feita pelo *software* Arduino IDE. No *software* é escrito um código em linguagem compreensível pelo hardware Arduino.

O valor médio de mercado da placa de microprocessador gira em torno de 400,00 reais.

5.1.4. Bloco em concreto

O bloco em concreto para o ensaio foi produzido nos traços convencionais utilizando cimento CPIII (Figura 29), nas dimensões 15x15cm.



Figura 29 – Bloco de concreto utilizado para o ensaio. (Acervo pessoal)

5.2. MÉTODO

Neste estudo foi proposto um método para análise do sistema de monitoramento de fissuras em concreto através do desenvolvimento de um protótipo, utilizando a régua potenciométrica e o paquímetro digital.

5.2.1. Produção do bloco de concreto e indução da fissura

O bloco de concreto para elaboração dos ensaios foi produzido com traços convencionais de 1:2:3, utilizando cimento CPIII, rodado na betoneira (figura 30) e moldado em blocos de 15x15cm conforme figura 31. A produção do bloco e posterior indução da fissura foram realizados no laboratório de ensaio de materiais da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC).



Figura 30 - Betoneira utilizada para produção dos blocos de concreto (Acervo pessoal)



Figura 31 - Moldes dos blocos de concreto (Acervo pessoal)

Após a cura do concreto aos 28 dias, com o intuito de se controlar a dimensão da fissura e seu posicionamento, o bloco de concreto foi rompido por tração na flexão em uma prensa hidráulica (figura 32). As duas partes resultantes possuem as faces, no local de rompimento, compatíveis tal qual um sistema macho-fêmea o que permite a sua aproximação de forma uniforme em todos pontos das áreas das faces.



Figura 32 - Rompimento do bloco em concreto na prensa hidráulica (Acervo pessoal).

O fato de se efetuar o rompimento da peça não altera o objeto do estudo, pois nada mais é que uma fissura, ou abertura no concreto, que afetou toda a sua dimensão.

5.2.2. Elaboração do protótipo

A base para movimentação do bloco foi elaborada em alumínio pela vidraçaria São José, com dimensões 28x18 cm.

Para a plataforma de suporte e controle da movimentação entres as partes do bloco, foi proposto um sistema similar ao dos nanômetros, em que a movimentação pode ser controlada pelo número de voltas aplicadas a um parafuso (figura 33), criando uma parte fixa e uma parte móvel.



Figura 33 - Base para apoio do bloco de concreto (Acervo pessoal).

A régua potenciométrica e o paquímetro foram instalados na base de modo que ao movimentar a parte móvel do bloco de concreto os elementos de medição das ferramentas se afastem permitindo a leitura do aparelho (figura 32).



Figura 34 – Protótipo elaborado para os ensaios (Acervo pessoal).

A movimentação então pode ser medida pelo paquímetro digital, obtendo-se o valor incremental em milímetros lido no visor digital. E pela régua potenciométrica ao conecta-la ao *software* pela placa de micro controlador.

A régua potenciométrica para ser utilizada como um sensor de posição é necessário ligar um dos terminais de extremidade a uma tensão positiva e o outro terminal a uma tensão negativa. A tensão do terminal central estará entre estes dois valores. Para isso a régua é ligada na placa de microcontrolador – Arduino.

O circuito microcontrolador é o responsável pelo suprimento de energia e por converter o sinal analógico que chega do sensor num sinal digital, o tipo de sinal “entendível” pelos circuitos eletrônicos.

O Arduino é capaz de armazenar informação em até dez bits. Assim, ao aplicar uma tensão de 5 volts ao circuito e efetuar a leitura no terminal central do potenciômetro este valor é convertido numa escala que varia entre 0 e 1023. Então cada variação de 1 bit equivale a uma variação de aproximadamente 0,004883 V.

A figura 35 apresenta-se o código inserido no Arduino pelo *software* padrão. Cada linha de programação será precedida por um comentário sobre sua

funcionalidade após o comando “// “, qualquer texto iniciado por tal comando é ignorado pelo compilador, desta forma, não ocupando memória do Arduino.

Em seguida, apresenta-se o Diagrama de Protoboard (figura 36) e o Diagrama Esquemático (figura 37) do circuito do experimento.

```
transdutor_linear
/*
  Projeto - Monitoramento de fissuras utilizando um transdutor linear potenciométrico
  */

// Apresentação das variáveis, que funcionam como locais para se armazenar dados
// O termo float indica que o dado presente na variável pode assumir valores decimais

float sensor;
float medida;

// A função setup é executada somente uma vez no início do programa
// Ela emite instruções gerais para o programa antes que o loop principal seja executado

void setup() {

  // Serial.begin diz ao Arduino iniciar as comunicações seriais
  // No nosso caso com o Monitor Serial do Software do Arduino
  // O número em parênteses indica a taxa de transmissão dos dados

  Serial.begin (9600);
}

// A função loop é executada continuamente enquanto o Arduino estiver ligado.

void loop() {

  // recebe o valor de tensão na porta analógica A0 e atribui à variável sensor

  sensor = analogRead(A0);

  // atribui à variável medida o valor de tensão convertido em milímetros

  medida = sensor*(13.15); // medida em milímetros
  medida = medida/1023;

  // escreve o valor recebido no monitor serial

  Serial.println(medida);

  // espera 500 milissegundos e refaz a ação do loop

  delay(500);
}
```

Figura 35 - Código de programação desenvolvido para o experimento. (Acervo pessoal)

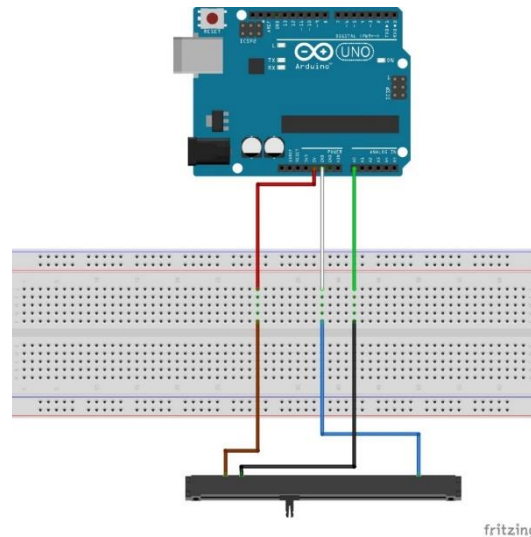


Figura 36 - Diagrama de Protoboard (<http://fritzing.org/home/>)

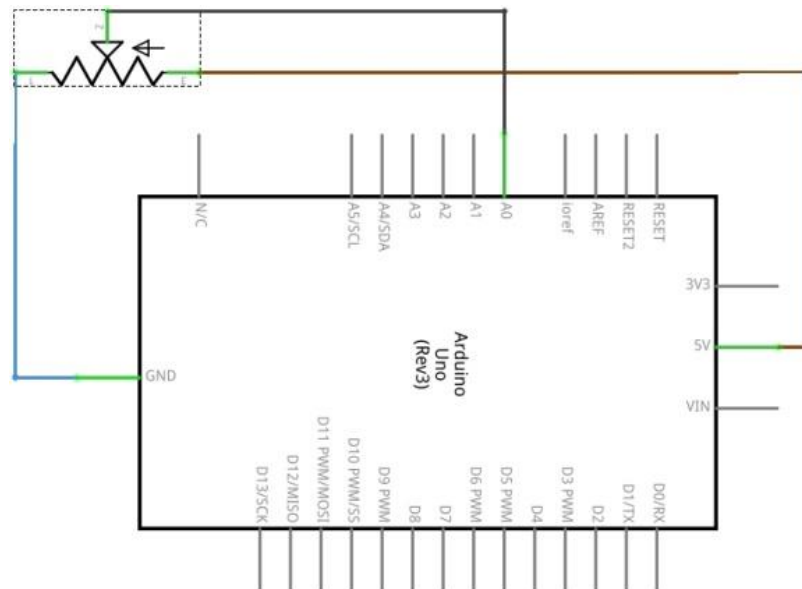


Figura 37 - Diagrama esquemático do circuito (<http://fritzing.org/home/>)

5.2.3. Ensaios elaborados

Para iniciar os ensaios com a régua potenciométrica foi realizado a verificação da confiabilidade do equipamento paquímetro com o uso do fissurômetro e da câmera microscópica (figura 38).



Figura 38 – Ensaio para confiabilidade do paquímetro (acervo pessoal).

O fissurômetro foi posicionado em cima da fissura e realizada a medida inicial de 0,2mm conforme figura 39.



Figura 39 - Medida da fissura pelo fissurometro (acervo pessoal).

Com o auxílio do parafuso da base em que o bloco de concreto se apoia, foi executada a abertura de 1mm no visor do paquímetro, ao final da medida o fissurômetro foi posicionado novamente em cima da fissura apresentando a abertura final de 1,2mm de espessura (figura 40).

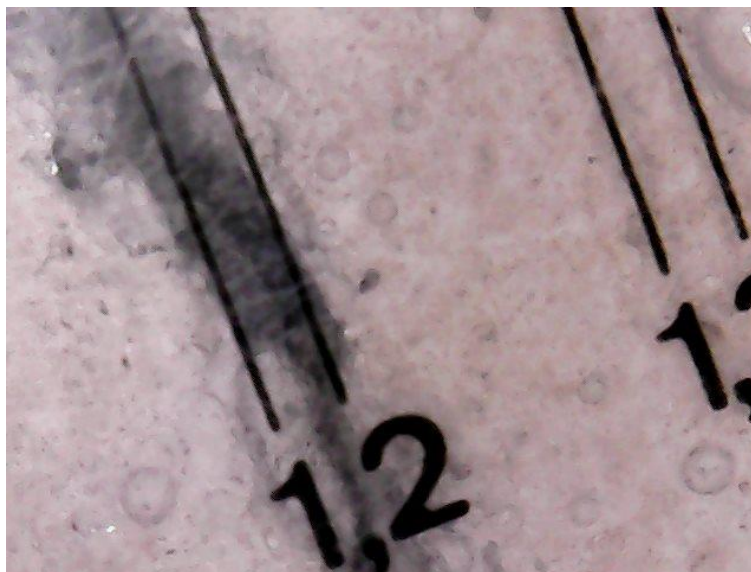


Figura 40 - Medida do fissurômetro na abertura final (Acervo pessoal).

Com a realização desse teste, podemos afirmar a confiabilidade do paquímetro, visto as aberturas iniciais e finais estarem de acordo com a leitura do fissurometro.

Dando continuidade aos ensaios, para determinação do comprimento real do cursor da régua potenciométrica foi realizado um teste em que foi se incrementando a distância entre as duas placas do bloco e observado a variação dos valores lidos no terminal central, devido ao fato de que estes equipamentos costumam ter uma parte que não varia a resistência do potenciômetro.

Após a determinação do comprimento do cursor, pôde-se utilizar o valor para fazer a conversão dos dados para milímetro, como observado no código de programação do Arduino.

Conforme Krishnamurthy & Raghavendra (2013), a precisão é o grau de repetitividade do processo de medição. É o grau de concordância das medições repetidas de uma quantidade feita usando o mesmo método, em condições similares. Se um instrumento não é preciso, ele daria resultados diferentes para a mesma dimensão para leituras repetidas.

Para tanto, foi determinado o início do teste quando o monitor serial indicava uma leitura de valor 10 - este valor foi definido por estar afastado do trecho inicial em que a variação linear não indicava variação da resistência do

potenciômetro – e, então, zera-se o marcador do paquímetro digital e incrementa-se intervalos de 1 mm até chegar no valor de 10mm, quando passa-se a incrementar intervalos de 2 mm até atingir o valor de 20 mm e intervalos de 5mm até atingir o valor de 35 mm.

As medidas foram anotadas manualmente no computador e os resultados serão avaliados em relação ao valor dos intervalos dentro de um ensaio e ao valor de cada determinado para cada ponto em diferentes ensaios. O teste foi realizado em 3 repetições para averiguar a precisão dos resultados. As figuras abaixo mostram a metragem do paquímetro conforme ensaio realizado (figura 41).

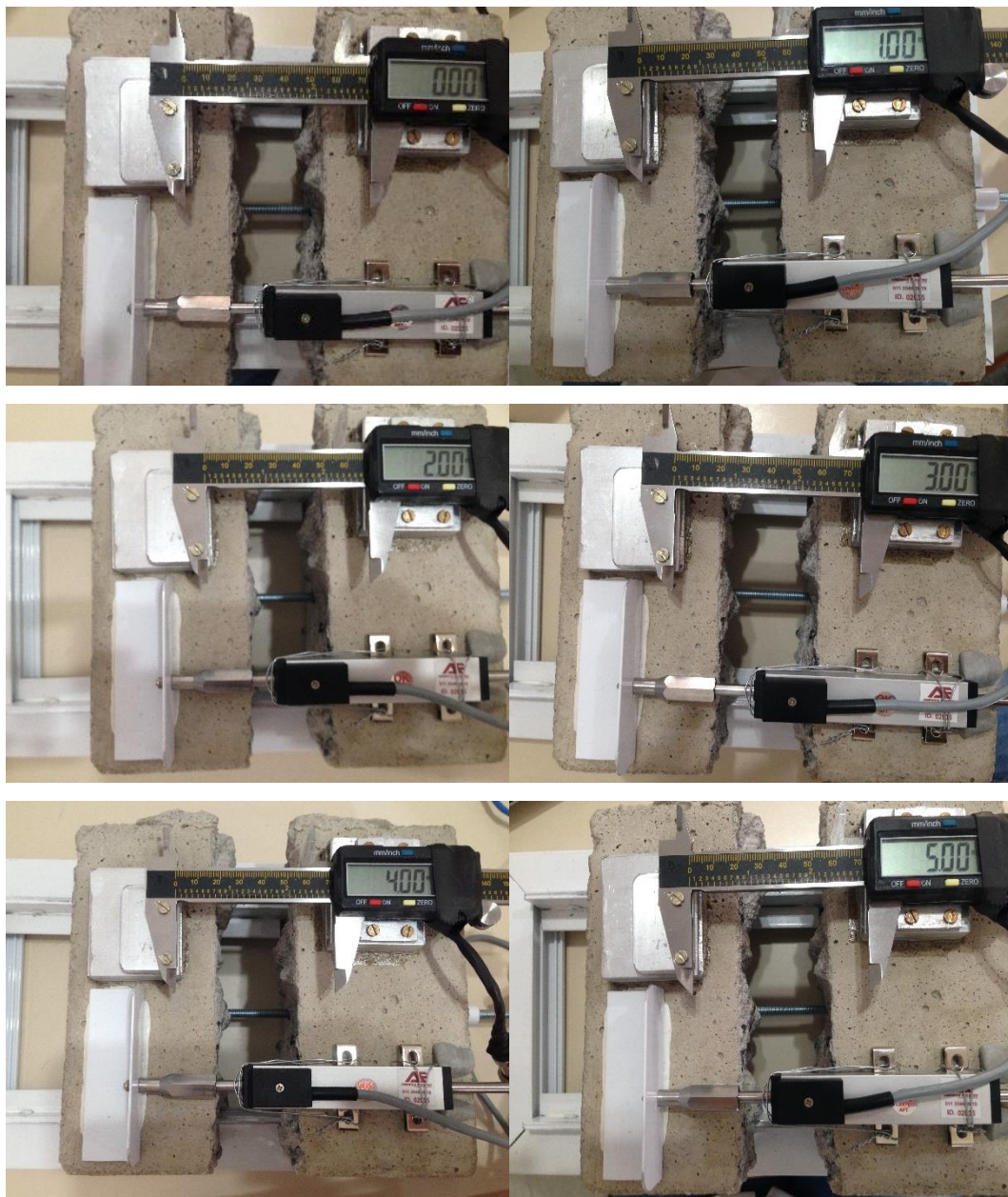


Figura 41 - Imagens do ensaio de 0 a 35 mm de deslocamento da fissura (Acervo pessoal)

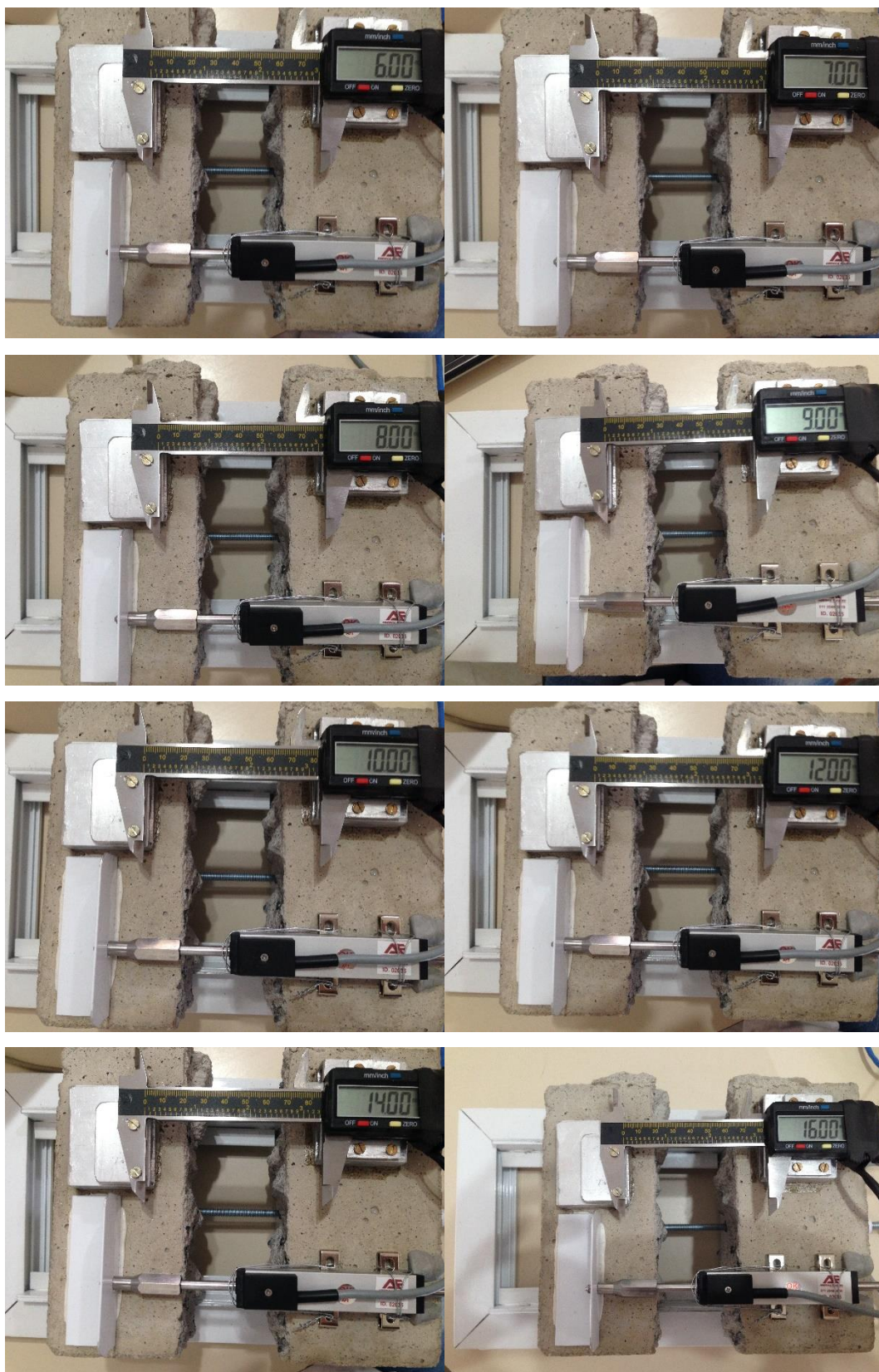


Figura 42 – Cont.: Imagens do ensaio de 0 a 35 mm de deslocamento da fissura (Acervo pessoal)

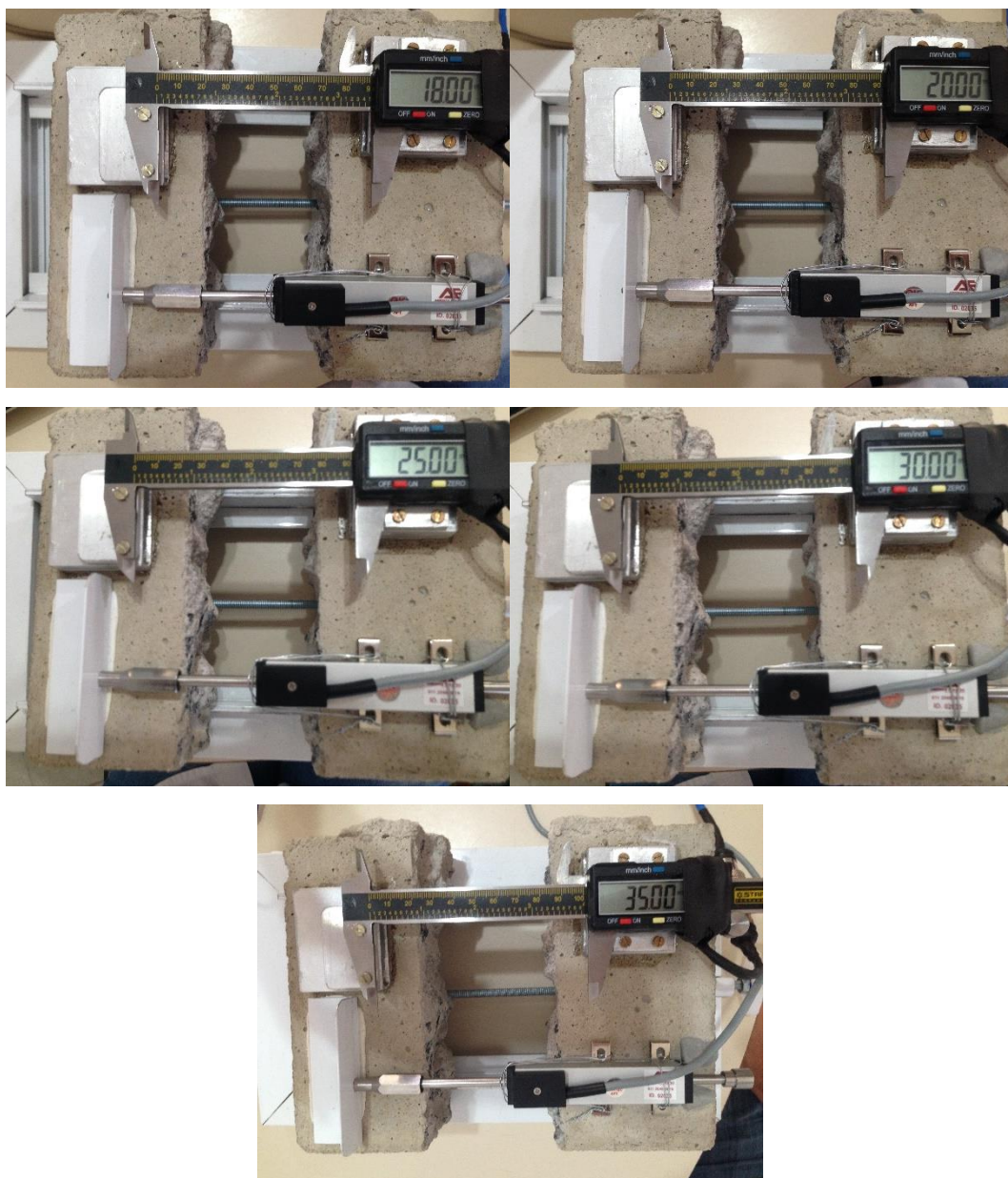


Figura 43 – Cont.: Imagens do ensaio de 0 a 35 mm de deslocamento da fissura (Acervo pessoal)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará a análise dos resultados dos testes realizados na parte experimental desta pesquisa. Os resultados apresentados no ensaio foram compilados nas tabelas abaixo e serão analisados para as devidas considerações finais do estudo.

As tabelas foram divididas de acordo com os testes realizados e possuem colunas indicando a medida de referência do paquímetro (P), a leitura da régua potenciométrica (RP), a variação da medida da RP por milímetro, a conversão dos valores da RP na medida métrica (RP_m), os valores da RP_c em milímetros corrigidos e a comparação desses valores com o de referência.

Para a conversão dos valores para RP_m foi utilizada a média das variações da RP por milímetro, que variou de acordo com os testes, no teste 1 o valor obtido foi de 20,64444, no teste 2 foi de 20,527778 e no teste 3 de 19,883333.

Para os valores de RP_c foi efetuada a subtração do valor inicial do RP_m em cada intervalo de medida, devido ao ponto inicial da régua potenciométrica ter iniciado no valor 10 pela falha do trecho inicial em que a variação linear não indicava variação da resistência do potenciômetro.

Os valores comparados na penúltima coluna é o resultado da subtração do RP_c pelos valores do paquímetro a fim de efetuar a análise da precisão do aparelho conforme última coluna.

Tabela 5 - Resultado do teste 1 (acervo pessoal).

TESTE 1						
P (mm)	RP	Variação (1/mm)	RP_m (mm)	RP_c (mm)	Valor Comparado (mm)	Análise de precisão – 0,01mm
0,00	10	-	0,48439182	0	-	
1,00	40	30	1,93756728	1,453175	0,453175457	Reprovado
2,00	64	24	3,10010764	2,615716	0,615715823	Reprovado
3,00	84	20	4,06889128	3,584499	0,584499462	Reprovado
4,00	104	20	5,03767492	4,553283	0,5532831	Reprovado
5,00	124	20	6,00645856	5,522067	0,522066738	Reprovado
6,00	143	19	6,92680301	6,442411	0,442411195	Reprovado
7,00	163	20	7,89558665	7,411195	0,411194833	Reprovado
8,00	184	21	8,91280947	8,428418	0,428417653	Reprovado
9,00	204	20	9,88159311	9,397201	0,397201292	Reprovado
10,00	223	19	10,8019376	10,31755	0,317545748	Reprovado
12,00	263	20	12,7395048	12,25511	0,255113025	Reprovado
14,00	303	20	14,6770721	14,19268	0,192680301	Reprovado
16,00	342	19,5	16,5662002	16,08181	0,081808396	Reprovado
18,00	379	18,5	18,3584499	17,87406	-0,12594187	Reprovado
20,00	419	20	20,2960172	19,81163	-0,1883746	Reprovado
25,00	520	20,2	25,1883746	24,70398	-0,29601722	Reprovado
30,00	622	20,4	30,1291712	29,64478	-0,35522067	Reprovado
35,00	722	20	34,9730893	34,4887	-0,51130248	Reprovado

Tabela 6 - Resultado do teste 2 (acervo pessoal).

TESTE 2						
P (mm)	RP	Variação (1/mm)	RP_m (mm)	RP_c (mm)	Valor Comparado (mm)	Análise de precisão – 0,01mm
0,00	10	-	0,487145	0	-	
1,00	42	32	2,046008	1,558863	0,558863329	Reprovado
2,00	61	19	2,971583	2,484438	0,48443843	Reprovado
3,00	81	20	3,945873	3,458728	0,458728011	Reprovado
4,00	101	20	4,920162	4,433018	0,433017591	Reprovado
5,00	121	20	5,894452	5,407307	0,407307172	Reprovado
6,00	140	19	6,820027	6,332882	0,332882273	Reprovado
7,00	162	22	7,891746	7,404601	0,404600812	Reprovado
8,00	181	19	8,817321	8,330176	0,330175913	Reprovado
9,00	200	19	9,742896	9,255751	0,255751015	Reprovado
10,00	219	19	10,66847	10,18133	0,181326116	Reprovado
12,00	259	20	12,61705	12,12991	0,129905277	Reprovado
14,00	299	20	14,56563	14,07848	0,078484438	Reprovado
16,00	338	19,5	16,46549	15,97835	-0,02165088	Reprovado
18,00	378	20	18,41407	17,92693	-0,07307172	Reprovado
20,00	418	20	20,36265	19,87551	-0,12449256	Reprovado
25,00	520	20,4	25,33153	24,84438	-0,1556157	Reprovado
30,00	623	20,6	30,34912	29,86198	-0,13802436	Reprovado
35,00	723	20	35,22057	34,73342	-0,26657645	Reprovado

Tabela 7 - Resultado do teste 3 (acervo pessoal).

TESTE 3						
P (mm)	RP	Variação (1/mm)	RP_m (mm)	RP_c (mm)	Valor Comparado (mm)	Análise de precisão – 0,01mm
0,00	10	-	0,502934	0	-	
1,00	30	20	1,508801	1,005868	0,00587	Aprovado
2,00	50	20	2,514669	2,011735	0,01174	Reprovado
3,00	70	20	3,520536	3,017603	0,0176	Reprovado
4,00	90	20	4,526404	4,02347	0,02347	Reprovado
5,00	110	20	5,532272	5,029338	0,02934	Reprovado
6,00	129	19	6,487846	5,984912	-0,0151	Reprovado
7,00	149	20	7,493713	6,99078	-0,0092	Aprovado
8,00	169	20	8,499581	7,996647	-0,0034	Aprovado
9,00	189	20	9,505448	9,002515	0,00251	Aprovado
10,00	208	19	10,46102	9,958089	-0,0419	Reprovado
12,00	248	20	12,47276	11,96982	-0,0302	Reprovado
14,00	287	19,5	14,4342	13,93127	-0,0687	Reprovado
16,00	327	20	16,44593	15,943	-0,057	Reprovado
18,00	367	20	18,45767	17,95474	-0,0453	Reprovado
20,00	407	20	20,4694	19,96647	-0,0335	Reprovado
25,00	508	20,2	25,54904	25,0461	0,0461	Reprovado
30,00	610	20,4	30,67896	30,17603	0,17603	Reprovado
35,00	709	19,8	35,65801	35,15507	0,15507	Reprovado

No final da análise de precisão foi verificado estatisticamente que no teste 1 e 2, 100 % dos resultados foram reprovados pois apresentam valores maior que 0,01mm, no teste 3, 22,22% dos valores medidos foram aprovados por estar abaixo de 0,01mm. No total apenas 4 medições foram aprovadas de 54 realizadas.

Observa-se que os valores iniciais possuem maior variação em relação a medida métrica, essa variação pode ter influenciado o resultado da análise de precisão, devido ao acúmulo do erro.

Conforme observado nas leituras da régua potenciométrica, em seus valores corrigidos em milímetros, e observando os gráficos dos testes apresentados abaixo, ocorre uma certa linearidade dos resultados, o que viabiliza a régua

potenciométrica para medições qualitativas, como por exemplo o monitoramento da atividade da fissura.

Gráfico 1 – Relação do teste 1 entre os valores corrigidos em milímetros da régua potenciometrica e o paquímetro (acervo pessoal).

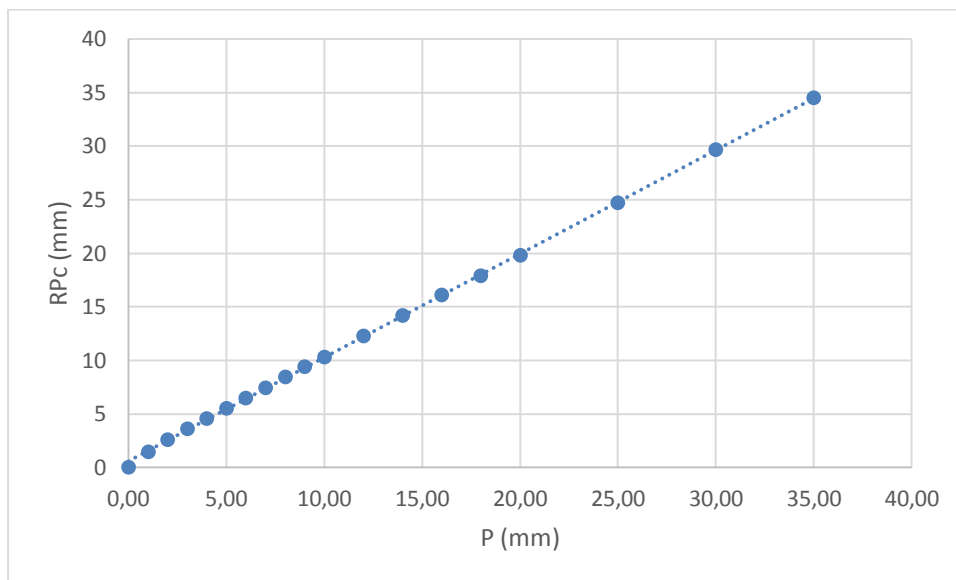


Gráfico 2 - Relação do teste 2 entre os valores corrigidos em milímetros da régua potenciometrica e o paquímetro (acervo pessoal).

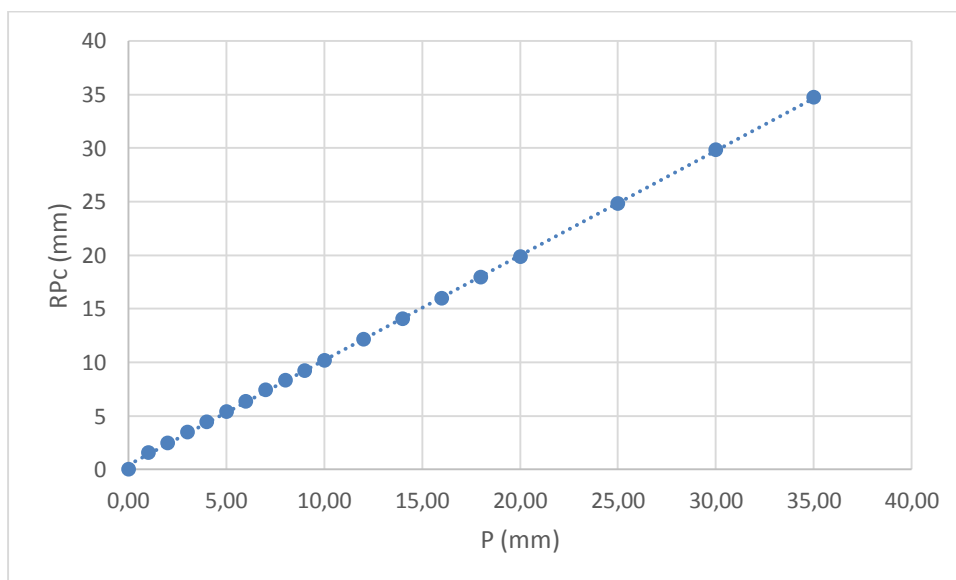
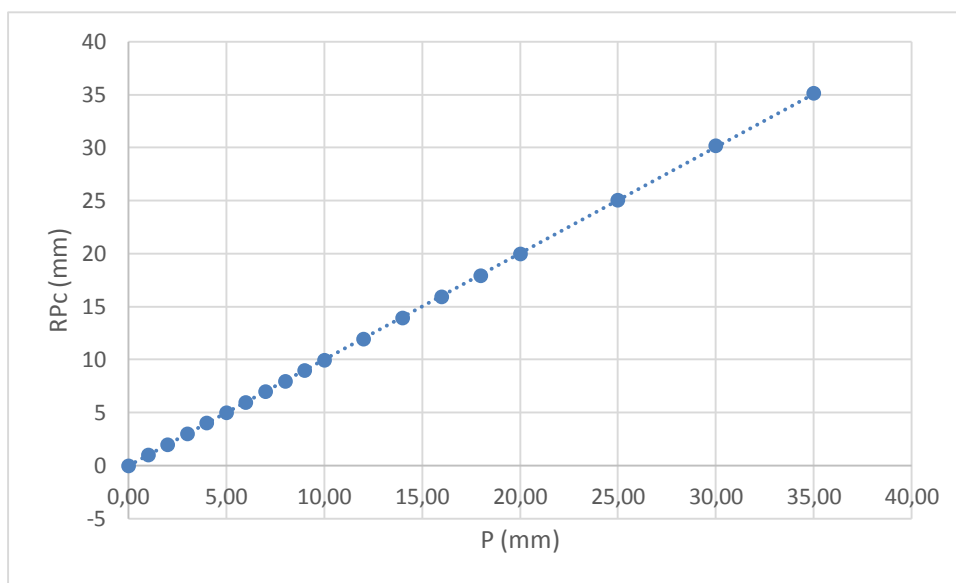


Gráfico 3 - Relação do teste 2 entre os valores corrigidos em milímetros da régua potenciometrica e o paquímetro (acervo pessoal).



7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O objetivo desse trabalho foi estudar a viabilidade técnica da régua potenciométrica no monitoramento contínuo de fissuras em materiais de concreto. As considerações finais seguem conforme resultados apresentados:

- No final da análise de precisão foi verificado estatisticamente que no total dos resultados medidos apenas 4 medições foram aprovadas, ou seja, 7,4% das 54 realizadas.
- A régua potenciométrica demonstra viabilidade para o uso no monitoramento de fissuras para fins qualitativos.
- A régua potenciométrica apresenta-se como um equipamento de baixo custo no mercado comparado com outros transdutores tipo LVDT.
- Os resultados podem ter apresentado erro devido a posição relativa do paquímetro com o bloco de concreto. Visto a não padronização desse tipo de ensaio.

Como recomendação para os trabalhos futuros sugere-se:

- A aplicação do teste com modelos diversos de régua potenciométrica averiguando sua precisão na leitura linear.
- Realizar o método proposto através da repetibilidade e reprodutibilidade com maior número de ensaios.
- Realizar o método proposto como outros modelos de protótipo.
- Comparar a régua potenciométrica com outros equipamentos de medição para monitoramento.
- Realizar estudos de viabilidade do uso do paquímetro no monitoramento automatizado de fissuras devido também ao baixo custo relacionado a outros equipamentos.

- Aplicar o método apresentado em uma obra, como estudo de caso.
- Aplicar sensores térmicos e de umidade ao circuito para uma leitura completa da manifestação patológica.
- Aplicar outros componentes ao sistema como transmissor de dados e retificador de tensão.
- Realizar ensaios em outros substratos.
- Utilizar uma placa micro controladora com maior qualidade na aquisição dos dados.

8. REFERÊNCIAS

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas em concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ACT LVDT Displacement Transducer. Acesso em 25 de janeiro de 2017.<<http://www.rdpe.com/us/act.htm>>

ALONSO, U. R. **Previsão e Controle das Fundações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1991.

BUNGEY, J.H; MILLARD, S.G.; GRANTHAM, M.G. **Testing of Concrete in Structures**. Taylor & Francis, New York, 4ed, 2006.

CHENG, C.C; CHENG, T.M; CHIANG C.H. **Defect detection of concrete structures using both infrared thermography and elastic waves**, Autom. Constr. v18, p. 87–92, 2008.

Como funcionam os LVDTs (ART113). Acesso em 25 de janeiro de 2017. <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/826-como-funcionam-os-lvdt-art113>>

DEGALA, S.; RIZZO, P.; RAMANATHAN, K.; HARRIES K.A. **Acoustic emission monitoring of CFRP reinforced concrete slabs**, Constr. Build. v 23, p. 2016–2026, 2009.

DUNN, William C. **Fundamentos de Instrumentação Industrial e Controle de Processos**. Bookman, 2013.

FERNANDEZ-CANQUE, Hernando Lautaro. **Analog Electronics Applications – Fundamentals of Design and Analysis**. Taylor & Francis Group, 2017.

KRAKHMAL'NY, S.I.; EVTUSHENKO, M; KRAKHMAL'NAYA, P. **New System of Monitoring of a Condition of Cracks of Small Reinforced Concrete Bridge Constructions**. Procedia Engineering. v. 150, p. 2369 – 2374, 2016.

LVDT Tutorial. Acesso em 25 de janeiro de 2017.<<http://www.te.com/usa-en/industries/sensor-solutions/insights/lvdt-tutorial.html>>

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: Pini, 2007.

MARTINS, P.A.; JUNIOR C.P. **Inspeção de fissuras em alvenaria utilizando visão computacional**. 10ª Conferencia brasileira de Dinâmica, controle e aplicações. São Paulo. 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo: PINI, 2008.

ORLOWSKI, E. A. G.; LACERDA, L. A. **Avaliação e Monitoramento de Trincas em Barragens de Concreto Estudo de Caso UHE Mascarenhas**. Acesso em 10 de janeiro de 2017. <http://www.cgti.org.br/publicacoes>.

RAFIQUZZAMAN, Mohamed. **Fundamentals of Digital Logic and Microcontrollers**. Wiley, 2014.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4. ed. São Paulo: Zigurate, 2008.

ROBINS, P.; AUSTIN, S.; CHANDLER, J.; JONES P. **Flexural strain and crack width measurement os steel-fibre-reinforced concrete by optical grid and electrical gauge methods**. Cement and concrete. v 31. p 719-729, 2001.

SANTOS, G.V. **Patologias devido ao recalque diferencial em fundações**. Brasília, 2014.

SHAH, A.A; RIBAKOV, Y.; HIROSE, S. **Nondestructive evaluation of damaged concrete using nonlinear ultrasonics**. Mater, p. 775–782, 2009.

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço das estruturas**. São Paulo: Pini, 1998.

THOMAZ, E. **Tecnologia, gerenciamento e qualidade na construção**. São Paulo: Pini, 2001.

WOLF, J.; PIRSKAWETZ, S.; ZANG A. **Detection of crack propagation in concrete with embedded ultrasonic sensors**. Engineering Fracture Mechanics. v 146, p. 161–171, 2015.

ZHAO, J.; BAO, T.; CHEN R. **Crack monitoring capability of plastic optical fibers for concrete Structures**. Optical Fiber Technology. v 24, p. 70–76, 2015.

ZHOU, J.; XU, Y.; ZHANG, T. **A Wireless Monitoring System for Cracks on the Surface of Reactor Containment Buildings**. Journal ListSensors. v.16(6). 2016.