

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA - CTEC
ENGENHARIA CIVIL

KEVIN TENÓRIO LOBO MARTINS DE SOUZA

**CÁLCULO DE PROPRIEDADES DE FRATURAMENTO DO
CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS DE AÇO UTILIZANDO
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS E MECÂNICA DA
FRATURA LINEAR ELÁSTICA**

MACEIÓ-AL
2021

KEVIN TENÓRIO LOBO MARTINS DE SOUZA

**CÁLCULO DE PROPRIEDADES DE FRATURAMENTO DO
CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS DE AÇO UTILIZANDO
CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS E MECÂNICA DA
FRATURA LINEAR ELÁSTICA**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas - CTEC/UFAL, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. William Wagner Matos Lira

Coorientador: Prof. Dr. Romildo dos Santos Escarpini
Filho

MACEIÓ-AL
2021

Folha de Aprovação

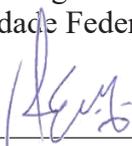
AUTOR: KEVIN TENÓRIO LOBO MARTINS DE SOUZA

Análise de Propriedades de Fratura do Concreto Reforçado por Fibras de Aço Utilizando Correlação de Imagens Digitais. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Alagoas.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovada em 22 de Janeiro de 2021.

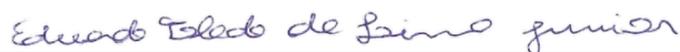


Prof. Dr. William Wagner Matos Lira (Orientador)
Universidade Federal de Alagoas

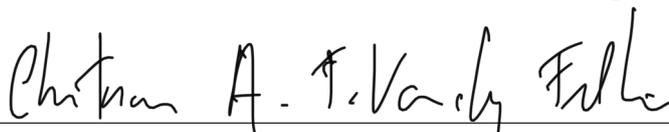


Prof. Dr. Romildo dos Santos Escarpini Filho (Coorientador)
Universidade Federal de Alagoas

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas



M.e Christiano Augusto Ferrarini Várady Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Alagoas

Aos meus pais Viviane e Valmiro que com muito amor e esmero construíram a base de quem sou.

À minha parceira Layla; meus amigos Leonardo, Bruno, Pedro e Felipe; meus queridos tios Jean, Vívian e Vilker; meus amigos da Blades of Arno e do 7ofus; meus colegas de turma e minha família que juntos me ajudaram a encontrar propósito e alegria.

Ao meu irmãozinho Pedro. Que meus aprendizados me permitam contribuir com os seus.

AGRADECIMENTOS

Às instituições que me deram suporte no desenvolvimento de minhas pesquisas e estudos: UFAL, CNPQ, FAPEAL e LCCV.

Aos professores Romildo e William pela orientação, aprendizado e sabedoria.

Aos parceiros de pesquisa Kaio e Christiano pela produção acadêmica que serve de base para este trabalho e pelas horas e neurônios gastos me ajudando.

Aos meus colegas de turma por compartilhar os momentos de estudo antes das provas, de tristeza após e de celebração ao fim do período.

A todos os professores do curso de Engenharia Civil do CTEC pelo conhecimento e pelo despertar da minha afinidade por pesquisa e ensino.

Aos meus amigos e família pelo incondicional apoio e carinho.

*Somewhere, something incredible is waiting to
be known. Carl Sagan.*

RESUMO

A grande demanda por ensaios mecânicos na engenharia estimula a utilização e desenvolvimento de diversos métodos de medição. Neste contexto, correlação de imagens digitais (CID) é uma técnica barata, prática e precisa para medição de deslocamentos de superfície de uma forma não-intrusiva. CID consiste em correlacionar pares de imagens tomadas da superfície de um espécime sob efeito de cargas em diferentes estágios, resultando nos campos de deslocamentos. Ao utilizar conceitos da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE), os campos de deslocamentos podem ser aplicados para calcular algumas das propriedades de fratura do material. A estratégia explorada neste trabalho utiliza imagens tomadas de vários ensaios de flexão em três pontos (EF3P) aplicado a vigas de concreto reforçado por fibras de aço (CRFA) para medição dos campos de deslocamento por meio da CID, aplicando o software *open-source* NCorr. Estes campos de deslocamento são utilizados na criação de extensômetros virtuais posicionados ao longo da linha de fissura dos espécimes para estudar sua abertura. Os parâmetros de fratura são computados de equações da MFLE utilizando os deslocamentos previamente medidos. A estratégia proposta é uma alternativa robusta que pode ser um mecanismo poderoso para analisar e validar propriedades de materiais utilizados em diversos problemas da engenharia.

Palavras-chave: Ensaio de Flexão em Três Pontos. Energia de Fraturamento. Campos de Deslocamentos. Tenacidade à Fratura.

ABSTRACT

The great demand for mechanical tests in engineering induces the usage and development of several alternative measurement methods. In this context, digital image correlation (DIC) is a practical, accurate and inexpensive technique for measuring surface displacement in a non-intrusive way. DIC consists in correlating pairs of images taken from the surface of the specimen under stress in distinct stages of loading, resulting in the displacement fields. By using the concepts from linear elastic fracture mechanics (LEFM), the displacement fields can be applied to evaluate some fracture properties of the material. The strategy addressed in this work uses images taken from a number of three-point bending tests (3PBT) of steel fiber reinforced concrete (SFRC) specimens as input data and measures the displacement field by DIC using the open-source software NCorr. This displacement field is used to create virtual extensometers in order to study the crack opening. The fracture properties are then computed from LEFM equations with the displacement previously calculated. The proposed strategy is a robust alternative and it can be a powerful mechanism to analyze and validate the material properties used in several engineering problems.

Keywords: Three-point Bending Test. Fracture Energy. Displacement Fields. Fracture Toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Etapas da metodologia adotada.	10
Figura 2.1 – Esquema de captação de imagem para CID.	12
Figura 2.2 – Esquema dos passos básicos do algoritmo de CID implementado no NCorr.	13
Figura 2.3 – Interpolação por <i>spline</i> bicúbica.	14
Figura 2.4 – Exemplo de funcionamento do CID-GC.	15
Figura 2.5 – Diagrama de corpo livre do ensaio de flexão de três pontos (dimensões em mm).	16
Figura 2.6 – Curva P-CMOD com marcações para ELS e ELU.	17
Figura 2.7 – Os três modos de fratura.	17
Figura 2.8 – Propagação de fissuras na presença de fibras.	20
Figura 3.1 – Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.	21
Figura 3.2 – Espécime prestes a iniciar o ensaio de flexão de três pontos.	23
Figura 3.3 – Campo de deslocamentos medido pelo NCorr com extensômetros virtuais.	24
Figura 3.4 – Regressão linear dos dados de abertura ao longo da fissura.	25
Figura 3.5 – Gráfico de carga versus deflexão.	26
Figura 3.6 – Curva carga-deflexão para cálculo do trabalho.	27
Figura 4.1 – Comparação entre as medições do NCorr, LVDT e Itom.	29
Figura 4.2 – Diagrama de caixas de cada parâmetro obtido.	31
Figura 4.3 – Propagação de fissura típica de vigas de concreto.	33
Figura 4.4 – Propagação de fissura ocorrida nas vigas de CRFA.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Consumo mássico de materiais por m ³	22
Quadro 4.1 – Parâmetros de fraturamento dos espécimes ensaiados.	30
Quadro 4.2 – Comparação com os resultados obtidos por Yin, Qiao e Hu (2020)	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	JUSTIFICATIVA	9
1.2	OBJETIVOS	10
1.3	METODOLOGIA	10
1.4	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS	12
2.2	ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS	16
2.3	CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS	19
3	ESTRATÉGIA ADOTADA	21
4	RESULTADOS	28
4.1	VALIDAÇÃO DAS MEDIÇÕES POR CID	28
4.2	PARÂMETROS DE FRATURAMENTO	29
4.3	PROPAGAÇÃO DE FISSURA	32
5	CONCLUSÃO	35
	Referências	36

1 INTRODUÇÃO

No escopo da mecânica estrutural, há uma grande demanda por estudos experimentais investigativos. Mais comumente, estes buscam conclusões empíricas acerca do comportamento de um dado material sob condições mecânicas especificadas. Para isto, são realizados os ensaios mecânicos, onde corpos de prova são postos em máquinas especializadas que aplicam os carregamentos requeridos para as análises. A grande demanda por este tipo de ensaio impulsiona o meio científico a desenvolver e aprimorar as técnicas relacionadas à mecânica experimental, como as técnicas de medição. Destes experimentos, dados como deslocamentos e deformações são obtidos por meio de medições em tempo real. Tais medições costumam ser feitas de maneira intrusiva, ou seja, interferindo fisicamente no ensaio com dispositivos como o extensômetro. Outros métodos são considerados não-intrusivos, como *speckle method*, *grid method*, interferometria, raio-x e a correlação de imagens digitais (CID).

Entre os últimos, a CID se destaca como uma das técnicas mais simples e baratas de medir deslocamentos. De acordo com Pan (2018), o método consiste em comparar pares de imagens retiradas subsequentemente da superfície de um corpo de prova sob ensaio em estados de carregamento diferentes, com luminosidade, posicionamento da câmera fotográfica e outros fatores controlados. A CID foi idealizada inicialmente por Peters e Ranson (1982), que desenvolveram as características centrais que definem o método, porém ainda de forma não-otimizada e aplicada apenas a ensaios mecânicos. Nos anos subsequentes, as possibilidades de aplicação foram largamente expandidas, com trabalhos como He et al. (1984) e Chu, Ranson e Sutton (1985), com aplicações na mecânica dos fluidos. Ainda na mesma década, os primeiros estudos visando a otimização e a sofisticação do método começaram a surgir, como Sutton et al. (1986) e Bruck et al. (1989), que exploraram a análise de deformação planar e o método de Newton-Raphson para correção parcial diferencial como técnica de obtenção dos parâmetros.

Até então as aplicações de CID estavam limitadas à análise de superfícies planares, o chamado CID-2D. Com Luo et al. (1993), foram introduzidas técnicas para medições tridimensionais, criando o que se conhece como CID-3D e iniciando outros métodos similares que ainda viriam, como o CID-V (utilizando tomografia computacional ou raio-x) (SMITH; BAY; RASHID, 2002). Para tornar CID um método mais preciso, trabalhos como o de Schreier (2000) estudou os erros sistemáticos presentes nos dados resultantes, com continuidade em Schreier e Sutton (2002). Em Sun et al. (2005), uma formulação de CID utilizando funções de forma oriundas do Método dos Elementos Finitos (MEF) foi desenvolvida, promovendo uma abordagem diferenciada daquelas apresentadas na literatura até o momento. Com o tempo, uma série de *softwares* sofisticados foram desenvolvidos para aplicação da CID, com destaque para o NCorr (BLABER; ADAIR; ANTONIOU, 2015), que é um software *open-source* feito para o MATLAB. Com o intuito de testar os *softwares* de CID e auxiliar no desenvolvimento de novos, a Society for Experimental Mechanics propôs em 2018 o *DIC Challenge* (REU et al., 2018),

que estabeleceu uma série de desafios que os *softwares* deveriam superar para serem confiáveis, criando um novo padrão de qualidade na área.

Os deslocamentos medidos por CID não costumam ser o objetivo final das pesquisas que o aplicam. Normalmente, eles são requisitos para processos mais complexos que resultam em análises mais representativas dos materiais em estudo. Em Leclerc et al. (2009), os autores propõem a utilização das medições de CID para uma análise inversa com o intuito de calcular propriedades constitutivas. A CID pode ser utilizada para medição de abertura de fratura de maneira precisa, como visto em Smrkić, Koščak e Damjanović (2018). O mesmo é feito com espécimes de concreto reforçado por fibras em Ghahremannejad et al. (2018). Com algumas limitações, o CID pode ser utilizado no monitoramento de elementos estruturais *in situ*, podendo identificar e medir a abertura de fraturas em estruturas como pontes à medida que ocorrem (KÜNTZ et al., 2006). Em Yin, Qiao e Hu (2020), o autor propõe uma formulação baseada nos princípios da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) que utiliza de medições por CID para calcular propriedades de fratura de espécimes de concreto sob tensão no ensaio de flexão em três pontos (EF3P).

Além desses estudos, a Universidade Federal de Alagoas (UFAL) conta com uma linha de pesquisa em CID, tendo início com o desenvolvimento de um software de CID por Ferraz (2013), com posterior implementação em alto desempenho (VÁRADY FILHO, 2016). Uma análise inversa utilizando o software e imagens geradas a partir de simulações para identificação de propriedades constitutivas foi feita em Souza, Escarpini Filho e Várady Filho (2019). O estudo do concreto reforçado por fibras de aço (CRFA) utilizando CID na UFAL teve início com Oliveira et al. (2018) com a avaliação de seu comportamento e teve continuidade em Oliveira et al. (2019) e Oliveira (2019) com medições de abertura das fissuras em um EF3P. Partes dos resultados destes estudos foram utilizados no cálculo de parâmetros de fratura do CRFA em Souza et al. (2020), contendo resultados preliminares deste trabalho.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar da amplitude de áreas de aplicação da CID e do grande número de materiais avaliados pela mesma, o CRFA continua sendo pouco explorado na área. O método de Yin, Qiao e Hu (2020) deixa uma ótima oportunidade para tal, pois pode ser adaptado para aplicação no estudo de outros materiais, como o CRFA. Isto seria de interesse comum, pois pode ser uma alternativa a métodos já estabelecidos na academia. A validação deste método viabiliza sua utilização no estudo de diversos materiais, com suas devidas adaptações.

No âmbito do CRFA, ele teria utilidade no estudo da atuação do reforço por fibra na resposta do concreto de uma forma prática e barata. Além disso, a produção acadêmica da linha de pesquisa envolvendo CID e CRFA da UFAL deixa recursos a disposição para serem utilizados. Portanto, um estudo envolvendo a temática teria forte contribuição das vantagens apresentadas. Nesse contexto, este trabalho se propõe a explorar a lacuna que existe no estudo do CRFA por meio da CID.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o estudo das ações do reforço por fibras no concreto empregando o cálculo de parâmetros de fratura do CRFA utilizando a CID. Vigas de CRFA são submetidas ao EF3P, onde seus deslocamentos superficiais são medidos aplicando a CID e uma formulação para o cálculo dos parâmetros é desenvolvida. A principal contribuição do trabalho é a adaptação e aplicação de diferentes técnicas para o cálculo de parâmetros de fraturamento no CRFA.

1.3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, a metodologia adotada segue uma série de macro-etapas, conforme ilustrado na Figura 1.1. De forma geral, o estudo pode ser dividido em três: a experimental, onde os espécimes são confeccionados e ensaiados; a de medição, onde ocorre o processo de correlação de imagens digitais e a de cálculos dos parâmetros de fraturamento.

Figura 1.1 – Etapas da metodologia adotada.



Fonte: Autor (2021) .

A primeira etapa foi realizada como parte de um estudo anterior encontrado em Oliveira (2019). Ela envolve a moldagem e ensaio de oito espécimes de CRFA. Para fins de controle do início do processo de fissuração, entalhes foram feitos no centro do vão inferior das vigas. Sensores *linear variable differential transformer* (LVDT) foram postos sobre os entalhes. As vigas então foram submetidas ao EF3P e um registro de força por deflexão do ponto de aplicação do carregamento foi obtido.

A etapa de medição contempla a todos os processos envolvendo a CID, de obtenção das imagens ao pós-processamento. Durante o experimento, fotografias das vigas foram retiradas com luminosidade, angulação e posicionamento controlados por Oliveira (2019). Estas imagens foram utilizadas na etapa de medição, onde o software NCorr as compara em pares, aplicando o método CID para obter o campo de deslocamentos das superfícies das amostras. Também utilizando o NCorr, são aplicados extensômetros virtuais ao longo da fissura para formar um perfil de abertura de fissura e, por meio de regressão linear, estimar a abertura na parte inferior da viga, onde o entalhe foi feito.

A etapa de cálculos engloba o desenvolvimento e aplicação de uma formulação para o cálculo das propriedades de fratura. Com a relação força-deflexão e as medições feitas pelo

NCorr, uma versão adaptada da metodologia de Yin, Qiao e Hu (2020) foi aplicada, calculando parâmetros como módulo de elasticidade, tenacidade à fratura duplo-K, energia de fratura e outros.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Todas as medições feitas usando CID e NCorr são referentes unicamente às superfícies das amostras. Logo, o estudo do material é feito por meio de uma extrapolação do estudo de sua superfície, podendo resultar em erros. Além disso, os resultados deste estudo não foram comparados a outros que envolvam os mesmos materiais e ensaios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

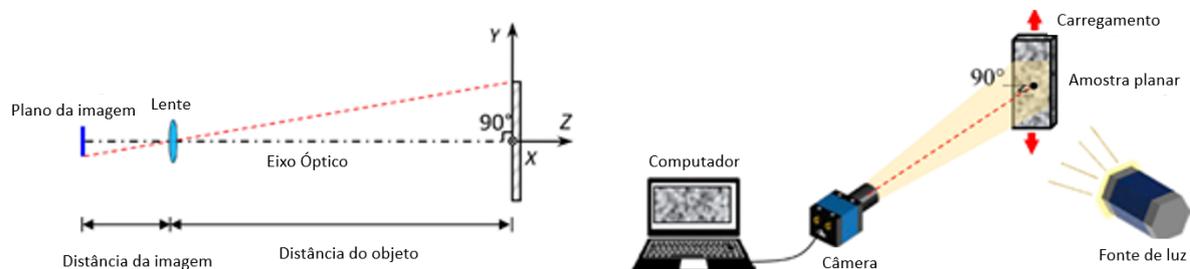
Esta seção explora os conceitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho e o alcance dos objetivos propostos, assim como fazer uma breve apresentação dos temas. Os assuntos tratados serão CRF, CID e EF3P, que juntos compõem a abordagem aplicada neste trabalho.

2.1 CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

Segundo Pan (2018), CID é um método óptico não-intrusivo baseado em imagens para medições globais e locais de deslocamento e deformação. De maneira resumida, o método consiste em comparar pares de imagens retiradas de superfícies planas sob estados distintos de carregamento, onde uma costuma ser chamada de imagem referência (ou original) e a outra de imagem corrente (ou deformada).

Geralmente, a determinação dos deslocamentos e deformações utilizando CID segue uma série de requisitos. A superfície do espécime a ser ensaiado deve apresentar um padrão aleatório de intensidade de cor para que o software seja capaz de rastrear cada região. Logo, costuma-se decorar a superfície da amostra com um padrão especular artificial, com exceção de superfícies que já possuam tal característica, como é o caso dos espécimes utilizados para este trabalho. A amostra deve estar exposta a uma fonte contínua e constante de luz, pois qualquer variação de iluminação pode dificultar o programa de medir os deslocamentos. De maneira similar, qualquer movimentação da câmera pode ser erroneamente captada como deslocamento da superfície, comprometendo o experimento. Além disso, a superfície da amostra deve ser plana e sua normal paralela ao eixo ótico da câmera. Qualquer deslocamento fora do plano causará erro nas medições. A Figura 2.1 ilustra um *setup* básico de captação de imagens para CID.

Figura 2.1 – Esquema de captação de imagem para CID.



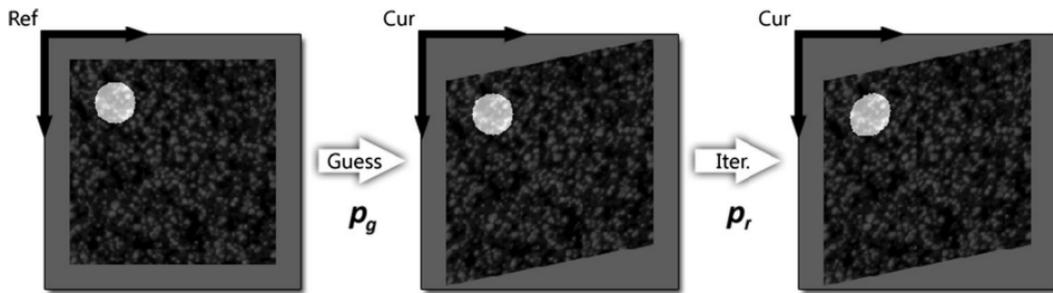
Fonte: Adaptado de Pan (2018) .

Após a captura das imagens, o programa computacional de CID inicia o processo de medição dos deslocamentos e deformações. Isto é feito por meio da comparação entre os pares

de imagens, sendo feito um rastreamento de uma região específica da imagem referência na imagem corrente. A comparação pode ser feita de várias formas diferentes, porém a abordada neste trabalho é a utilizada no software NCorr por Blaber, Adair e Antoniou (2015). Um resumo dos procedimentos é expresso aqui, porém uma visão detalhada do método pode ser encontrada na referência citada. Esta abordagem pode ser resumida como um problema de minimização de um coeficiente de correlação (função objetivo) entre as funções de escala de cinza das imagens referência e corrente, onde o fator de atualização é um vetor deslocamento. Logo, ao fim do processo, o deslocamento relativo de pontos do material é rastreado.

Após escolhida a imagem referência, a mesma é particionada em regiões menores chamadas de *subsets*, que são conjuntos de pixels onde a deformação é considerada homogênea. Para encontrar os deslocamentos e deformações de um *subset*, são resolvidos dois problemas de otimização, sendo um para o chute inicial que resulta em valores inteiros de deslocamento e outro para o refinamento que retorna valores sub-pixel de deslocamento e as deformações. Um esquema deste processo pode ser visto na figura 2.2.

Figura 2.2 – Esquema dos passos básicos do algoritmo de CID implementado no NCorr.



Fonte: Blaber, Adair e Antoniou (2015).

A correlação entre as imagens de referência e corrente pode ser obtida com a aplicação da Equação 1, que representa uma correlação cruzada e é mostrada a seguir:

$$C = \frac{\sum_{(i,j)} (f(x_{r_i}, y_{r_j}) - f_m) (g(x_{c_i}, y_{c_j}) - g_m)}{\sqrt{\sum_{(i,j)} [f(x_{r_i}, y_{r_j}) - f_m]^2 \sum_{(i,j)} [g(x_{c_i}, y_{c_j}) - g_m]^2}} \quad (1)$$

onde, f e g são respectivamente as funções intensidade de escala de cinza das imagens referência e corrente numa coordenada específica. As funções f_m e g_m correspondem aos valores médios de escala de cinza nos *subsets* de referência e corrente. De forma similar, os sufixos r e c das coordenadas x e y são referentes às imagens de referência e corrente, respectivamente.

Para encontrar o valor mínimo de C , o NCorr emprega um procedimento iterativo baseado na expansão por série de Taylor:

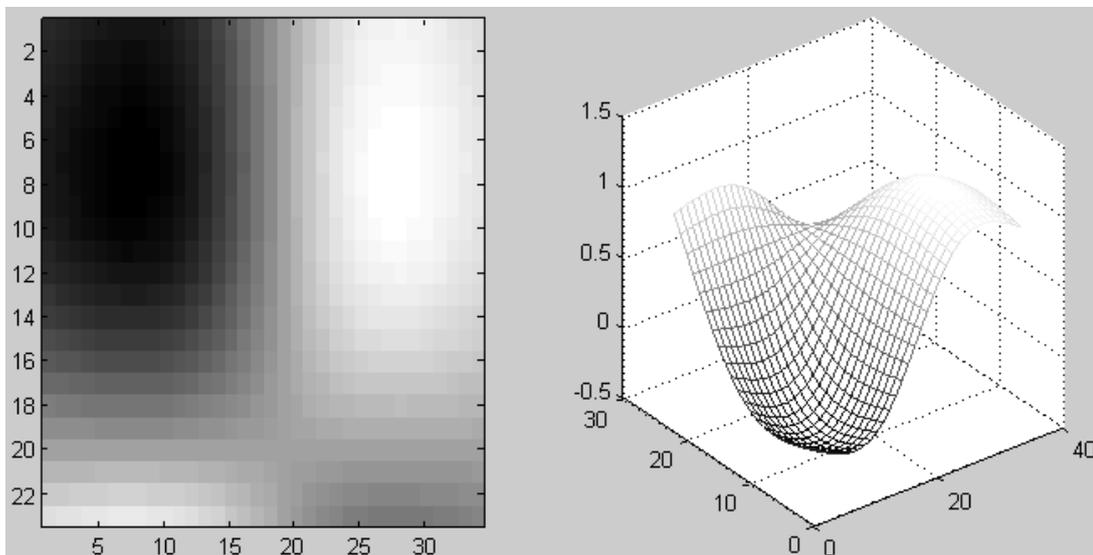
$$\nabla\nabla C(0)\Delta\mathbf{p} = -\nabla C(0) \quad (2)$$

onde $\nabla C(0)$ é o gradiente e $\nabla\nabla C(0)$ é a hessiana de C em $\mathbf{p} = 0$, sendo \mathbf{p} o vetor de deformações contendo os deslocamentos u e v e suas derivadas, que são constantes num *subset*. O vetor é dado pela Equação 3:

$$\mathbf{p} = \left\{ u \quad v \quad \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T. \quad (3)$$

Para que seja possível a computação é necessário que se faça uma interpolação entre os valores discretos da intensidade de cor nos pixels. Para isso, o NCorr utiliza interpolação por *splines* bicúbicas, que permitem a estimativa dos valores sub-pixel. Uma ilustração do funcionamento deste tipo de interpolação é vista a seguir:

Figura 2.3 – Interpolação por *spline* bicúbica.

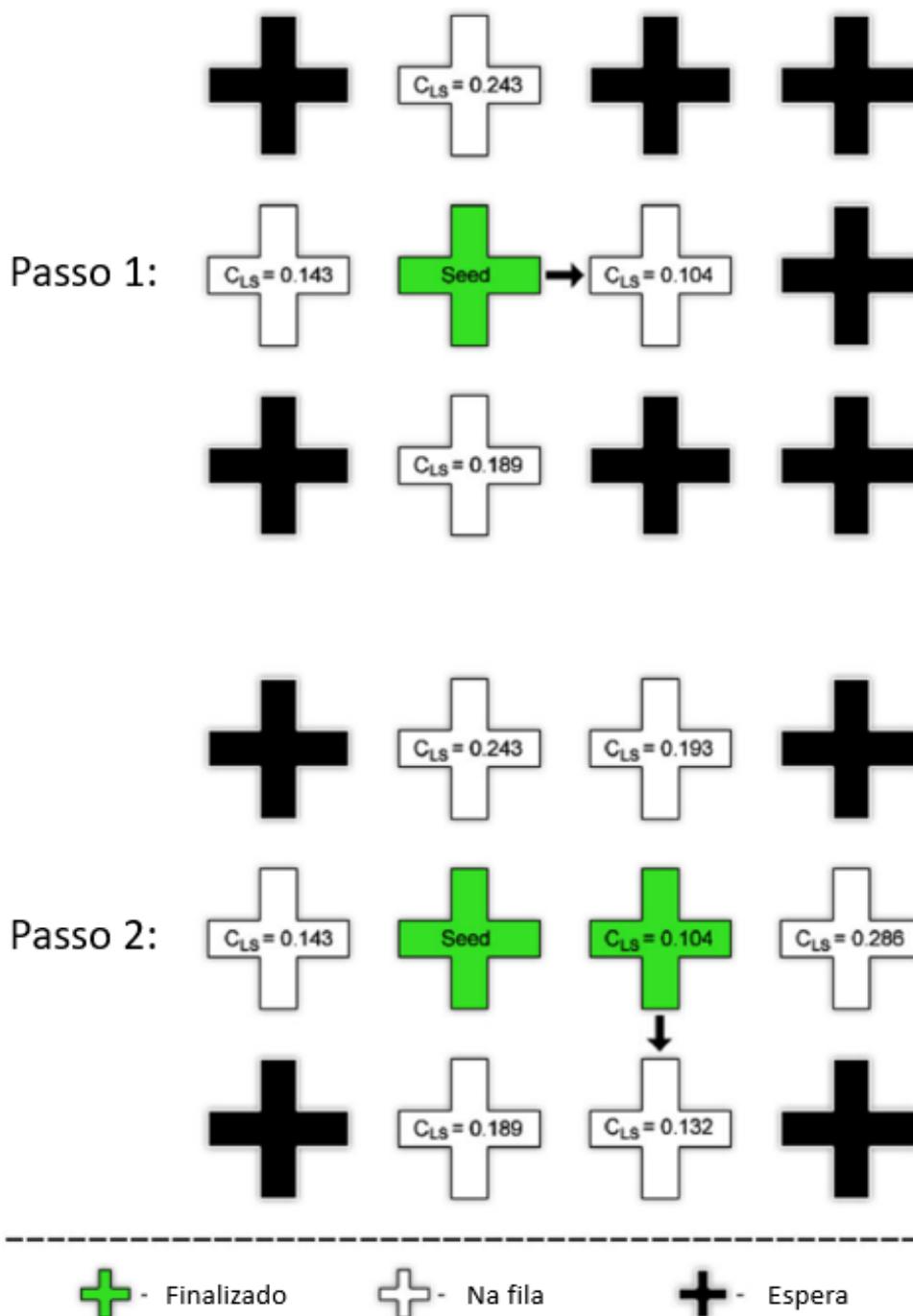


Fonte: Giassa (2016).

Os passos descritos até então descrevem como se calcula os dados de deslocamento referentes ao ponto central de um *subset* de referência. Para o cálculo dos deslocamentos de todos os *subsets*, o NCorr usa o método da correlação de imagens digitais guiada pela confiabilidade (CID-GC), visto em Pan (2009). O CID-GC resumidamente consiste em escolher *seed points* que servem como pontos centrais de *subsets* que passam pelo processo descrito anteriormente de

correlação. Em seguida, os *subsets* vizinhos utilizam o deslocamento calculado como chute inicial para o cálculo do coeficiente de correlação de acordo com a Equação 1. A ordem com a qual os deslocamentos dos vizinhos são refinados depende do coeficiente de correlação encontrado, onde os menores são priorizados. A Figura 2.4 ilustra o processo do CID-GC implementado no NCorr, onde C_{LS} é o coeficiente de correlação e cada cruz corresponde a um *subset*.

Figura 2.4 – Exemplo de funcionamento do CID-GC.



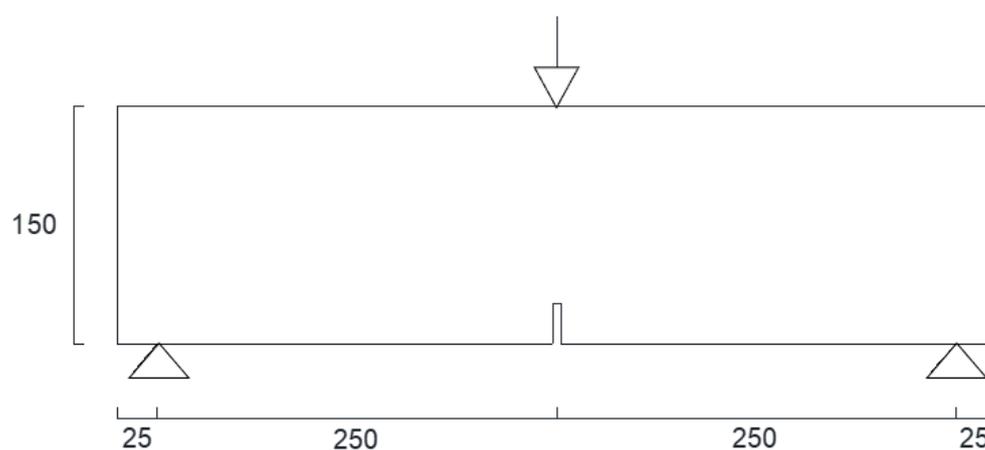
Fonte: Adaptado de Blaber, Adair e Antoniou (2015).

Uma série de outras funcionalidades está presente no algoritmo de CID do NCorr. Para diminuir o tempo computacional, o NCorr utiliza uma técnica de computação paralela, em que cada núcleo de processamento trabalha um *seed point* diferente. Ele também emprega uma técnica de correção de ruídos de deslocamento, baseada em Pan (2009), onde se calcula os gradientes de deslocamento de acordo com um algoritmo *strain window* e subsequentemente calcula as deformações de Green-Lagrange. Além disso, também estão presentes um método de atualização da região de interesse para grandes deformações e um algoritmo de conversão euleriano para lagrangiano para analisar campos de deslocamento descontínuos. Mais detalhes podem ser vistos em Blaber, Adair e Antoniou (2015).

2.2 ENSAIO DE FLEXÃO EM TRÊS PONTOS

O ensaio de flexão em três pontos (EF3P) é um dos mais utilizados para avaliar a resistência à tração por flexão do concreto. De acordo com a EN 14651:2007 (2010), o ensaio consiste na imposição de um deslocamento constante no centro do vão superior por meio de uma carga crescente concentrada em um espécime prismático. A norma fixa as dimensões da amostra em 550x150x150mm, com apoios posicionados na parte inferior de forma simétrica, deixando 500mm de vão. O prisma também apresenta um entalhe no centro do vão inferior de 25mm de altura e 5mm de espessura para controlar o local de início do fraturamento. O diagrama de corpo livre presente na Figura 2.5 ilustra o procedimento realizado em um EF3P.

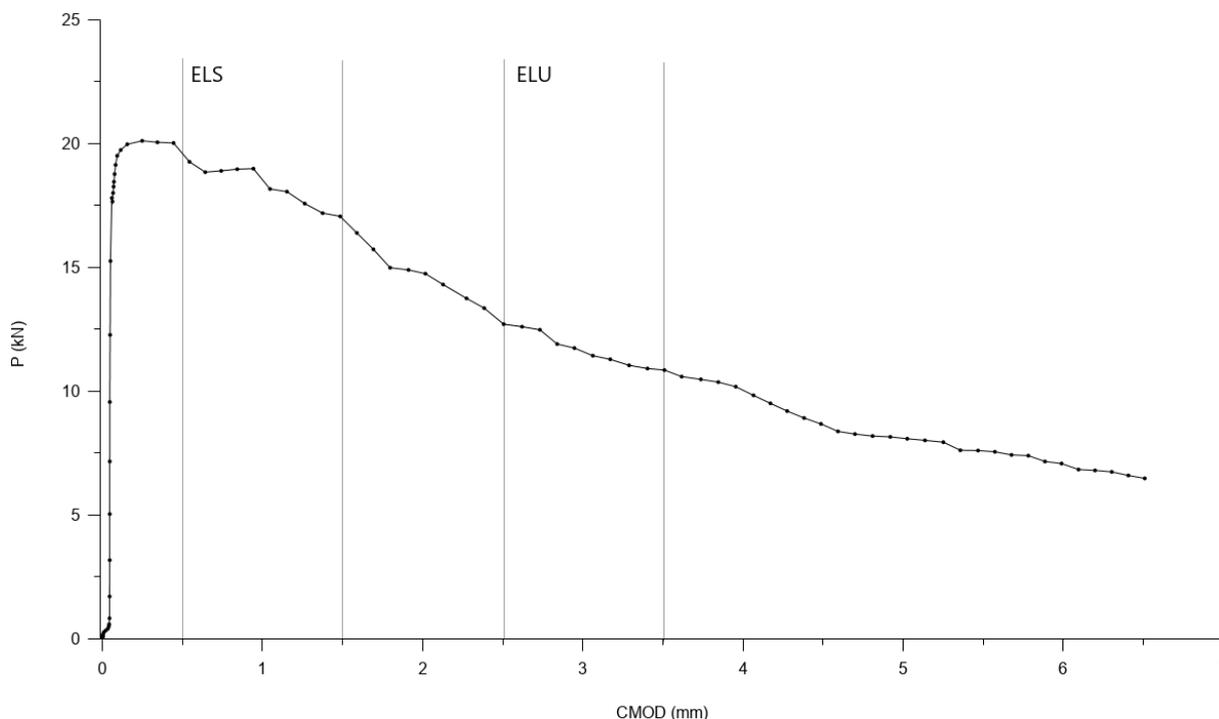
Figura 2.5 – Diagrama de corpo livre do ensaio de flexão de três pontos (dimensões em mm).



Fonte: Autor (2021).

Alguns resultados do ensaio são utilizados como fatores de definição do Estado Limite de Serviço (ELS) e do Estado Limite Último (ELU) na verificação do concreto. Ao observar a curva de carga versus abertura inferior (curva P-CMOD), é possível definir o carregamento relativo ao ELS (abertura de 0,5mm) e ao ELU (abertura de 2,5mm). A Figura 2.6 exemplifica o processo.

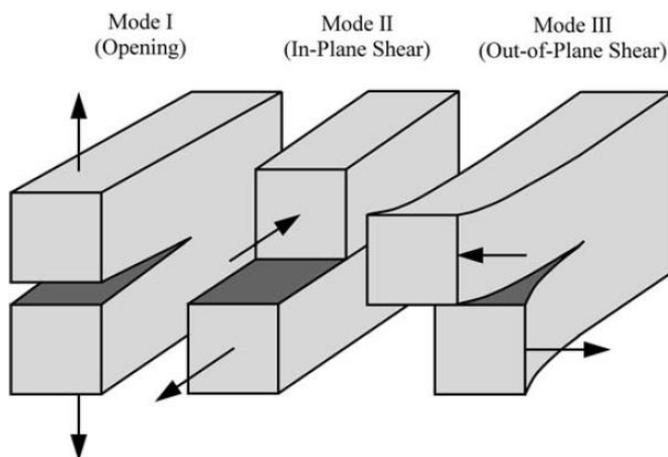
Figura 2.6 – Curva P-CMOD com marcações para ELS e ELU.



Fonte: Autor (2021).

De acordo com os conceitos de mecânica da fratura vistos em Anderson (2005), toda fratura pode ser classificada em três modos e suas combinações. O Modo I, também conhecido como modo de abertura, acontece quando o carregamento é aplicado de forma normal ao plano da fratura. O Modo II acontece quando o carregamento provoca cisalhamento paralelo ao plano de fratura. Por sua vez, o Modo III acontece quando o carregamento é aplicado de forma a provocar cisalhamento fora do plano de fratura. Desta forma, nota-se que no EF3P, apenas a fratura de Modo I ocorre. A Figura 2.7 ilustra a classificação.

Figura 2.7 – Os três modos de fratura.



Fonte: Anderson (2005) .

Um dos mais importantes parâmetros é a taxa de liberação de energia G_F idealizada por Griffith (1920) e remodelada por Irwin (1956), que é definida como uma medida da energia disponível para um incremento na extensão da fissura, também chamada de força de extensão de fissura. A tenacidade à fratura K , também definida por Irwin (1956), representa o quanto o material resiste até fraturar. $CMOD$ e $CTOD$ são parâmetros de abertura de fissura na boca e no topo do entalhe da mesma, respectivamente. Tais parâmetros podem ser calculados seguindo o equacionamento proposto por Yin, Qiao e Hu (2020) específico para o EF3P, que inicia com a identificação do módulo de elasticidade E_c :

$$E_c = \frac{6Sa_o V_\beta (a_o)}{BD^2 C_i}, \quad (4)$$

onde S , B e D são respectivamente o vão, largura e profundidade do espécime. a_o é o comprimento do entalhe posicionado na parte inferior central da viga, C_i é a conformidade inicial do gráfico carregamento versus deslocamento de abertura da boca da fissura (P-CMOD) e V_β é um fator geométrico definido por RILEM TC 162 TDF (2002).

Os parâmetros duplo-K de tenacidade à fratura são definidos por:

$$K_{Ic} = \sigma_N \sqrt{\pi a} F_\beta (a), \quad (5)$$

onde a é o comprimento da fissura, F_β é outro fator geométrico e σ_N é a tensão nominal avaliada por:

$$\sigma_N = \frac{3(P + Q/2) S}{2BD^2}, \quad (6)$$

onde Q é o peso do trecho entre os apoios e P é o carregamento aplicado. As equações 5 e 6 são aplicadas primeiramente para o cálculo da tenacidade à fratura inicial K_{Ic}^{ini} utilizando o comprimento do entalhe a_o como comprimento da fissura e a carga crítica inicial P_{ini} , que ocorre quando o espécime passa de deformação elástica para deformação plástica.

Para os cálculos da tenacidade à fratura instável K_{Ic}^{uns} , as mesmas equações são aplicadas à carga máxima alcançada no ensaio P_{max} (registrada no momento de ruptura) e ao comprimento crítico de fissura a_c , sendo o último calculado por:

$$CMOD_c = 4 \frac{\sigma_N a_c V_\beta (a_c)}{E_c}. \quad (7)$$

A Equação 8 computa a energia de fratura do material de acordo com RILEM TC 162 TDF (2002), onde W_t é o trabalho total feito pelo carregamento e δ_{max} é a deflexão máxima do ponto de carregamento ocorrida no momento de pico da curva.

$$G_F = \frac{Q \delta_{max} + W_t}{B (D - a_o)}. \quad (8)$$

Por último, o deslocamento de abertura da ponta da fissura $CTOD_c$ é calculado por:

$$CTOD_c = CMOD_c \sqrt{\left(1 - \frac{a_o}{a_c}\right)^2 + \left(1.081 - 1.149 \frac{a_c}{D}\right) \left(\frac{a_o}{a_c} - \frac{a_o^2}{a_c^2}\right)}. \quad (9)$$

O conjunto destes parâmetros é utilizado para melhor entendimento do comportamento em ruptura dos materiais estudados, além de comparação entre outros materiais que podam ser aplicados em ambientes onde ocorre fratura.

2.3 CONCRETO REFORÇADO POR FIBRAS

Nas últimas décadas, o uso de fibras, tanto naturais como artificiais, como aditivos na confecção de peças de concreto tem crescido extensivamente. Isto ocorre devido às diversas melhorias na performance mecânica do concreto que o uso de fibras proporciona, podendo atuar na melhoria da durabilidade, tenacidade, resistência a flexão, impacto, fadiga e fissura. Essas melhorias proporcionam um aumento na capacidade do concreto de absorver energia, como visto em Khalilpour, BaniAsad e Dehestani (2019).

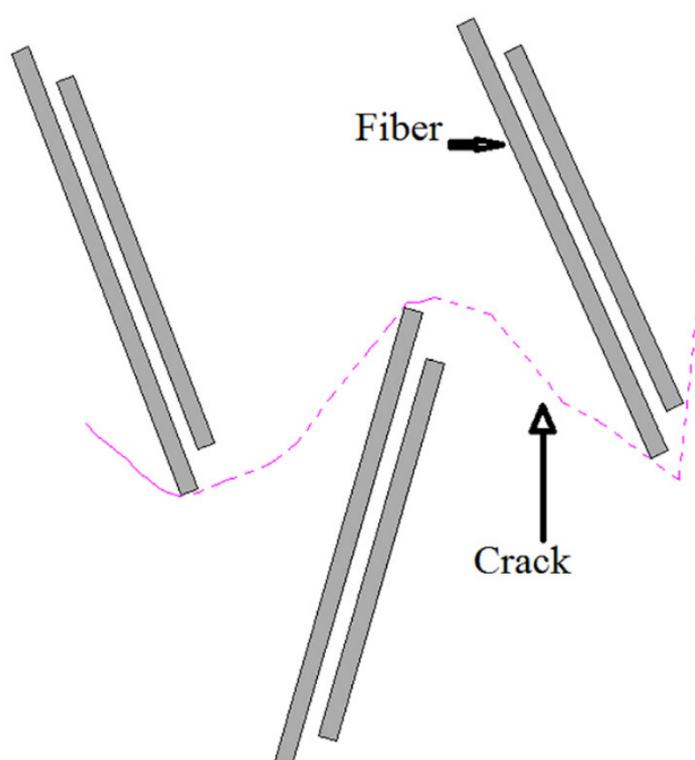
De acordo com Visintin et al. (2013), o concreto de alta resistência à compressão é frágil devido à baixa resistência à tração, resultando em uma fraca ligação na zona de transição da matriz cimentícia. Esta fraqueza pode ser mitigada com a adição de fibras de aço no concreto, proporcionando também um aumento considerável em sua resistência residual no estado de pós-fissuração. Segundo Ferrara et al. (2012), a adição de fibras pode promover melhorias suficientes para substituição parcial ou total de pequenos elementos estruturais. A depender da quantidade de fibra utilizada, sua atuação pode prevenir a formação de fissuras devido à absorção inicial de energia e aumentar consideravelmente o carregamento máximo da peça de concreto (SOROUSHIAN et al., 1998). Também é observado um aumento na ductilidade do concreto devido ao entrelaçamento de agregados, a depender do tipo de fibra utilizada (HOSSAIN et al., 2013).

Segundo Khalilpour, BaniAsad e Dehestani (2019), a função da fibra no concreto é controlar a fissuração e aumentar a tenacidade à fratura da matriz frágil por meio de pontes durante o fissuramento micro e macro da matriz. Neste aspecto, de acordo com Mo et al. (2014),

utilizar 0,5% a 1% de razão volumétrica de fibra de aço aumenta a tenacidade à fratura de 6 a 17 vezes. Da mesma forma, aumentar o comprimento das fibras de aço e acrescentar ganchos em seu formato também demonstra aumentar a absorção de energia.

Também é notável a mudança na forma de propagação da fissura que as fibras proporcionam, como pode ser visto na figura 2.8. Quando a fissura propaga pela matriz, a rigidez diminui devido à fratura e os esforços de tração são transferidos pela fibra. Desta forma, as fibras causam pontes entre as microfissuras, prevenindo a propagação e formação de microfissuras, como visto em Huang e Talreja (2006).

Figura 2.8 – Propagação de fissuras na presença de fibras.



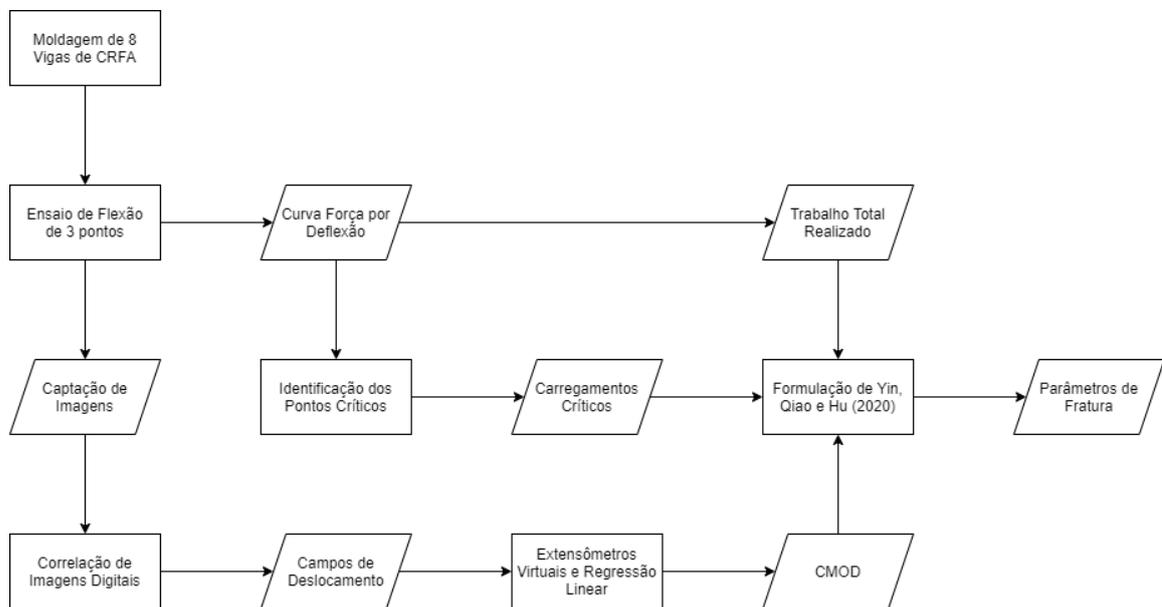
Fonte: Khalilpour, BaniAsad e Dehestani (2019) .

Apesar de todas as vantagens, a adição de fibras no concreto ocasiona uma perda de trabalhabilidade no mesmo. O aumento das áreas superficiais provoca um aumento na absorção de água, restringindo a fluidez do concreto. Além disso, as fibras podem prejudicar a mobilidade dos agregados graúdos. Portanto, a utilização de aditivos super-plasticantes e materiais de granulometria mais fina para tornar o concreto auto-adensável é recomendada.

3 ESTRATÉGIA ADOTADA

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, a estratégia adotada segue uma série de etapas que serão detalhadas nesta seção. De forma geral, o estudo pode ser dividido em três etapas: a experimental, onde os espécimes são confeccionados e ensaiados; o de medição, onde ocorre o processo de correlação de imagens digitais e o de cálculos dos parâmetros de fratura. O fluxograma presente na Figura 3.1 ilustra a estratégia adotada.

Figura 3.1 – Fluxograma das atividades realizadas no trabalho.



Fonte: Autor (2021).

Na primeira etapa, oito vigas de CRFA foram confeccionadas para o trabalho presente em Oliveira et al. (2018) seguindo o método proposto por EN 14651:2007 (2010). Todas as amostras foram produzidas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) da UFAL. Os espécimes apresentam 550 mm de comprimento, 150 mm de altura e 150 mm de profundidade. De acordo com Oliveira et al. (2019), o concreto é composto por cimento CP V-ARI, agregado miúdo e graúdo, água, resíduo de beneficiamento de mármore e granito (RBMG), superplastificante a base de éter policarboxílico e fibras de aço (1%). A dosagem escolhida para a confecção dos espécimes foi baseada em Gomes (2002) e é apresentada no quadro seguinte:

24 horas após a moldagem dos espécimes, inicializou-se o processo de cura, onde os mesmos repousaram submersos em tanques de água por 28 dias. Ao fim do processo, entalhes com 25 mm de profundidade e 2 mm de espessura foram realizados no centro do vão inferior das vigas. Para posterior utilização na validação das medições feitas por CID, sensores *linear variable differential transformer* (LVDT) foram posicionados sobre os entalhes.

Quadro 3.1 – Consumo mássico de materiais por m³

Materiais	Massa (kg)
Cimento	377,90
RBMG	188,95
Agregado Miúdo	774,53
Agregado Graúdo	813,75
Água Inicial	151,16
Água Complementar	37,75
Água de Absorção	11,17
Superplastificante	6,30
Fibras de Aço	25,98

Fonte: Oliveira et al. (2019)

O ensaio adotado neste trabalho é o EF3P, realizado por uma máquina Shimadzu® Autograph AG-X Plus. Dois apoios foram posicionados a 25 mm das laterais dos espécimes. As amostras foram postas a uma deflexão de ponto de carga constante de 0,05 mm/min. As informações de carregamento e deflexão aplicadas pela máquina são utilizadas posteriormente para os cálculos dos parâmetros de fratura.

A aquisição de imagens foi realizada durante o processo experimental. Algumas medidas foram tomadas para evitar o comprometimento do processo. A câmera precisa estar estática, posicionada perpendicularmente à superfície do espécime. A superfície da amostra deve apresentar um padrão de cinza especularizado e, para melhorar o contraste das imagens, as vigas foram iluminadas com lâmpadas LED azuis. Essas medidas são adotadas para minimizar qualquer causa potencial de ruído no processo de aquisição de imagens. As etapas descritas até este ponto foram realizadas para estudos anteriores encontrados em Oliveira (2019) e são aproveitados para este trabalho. Uma das imagens retiradas nesta etapa é mostrada a seguir como exemplo:

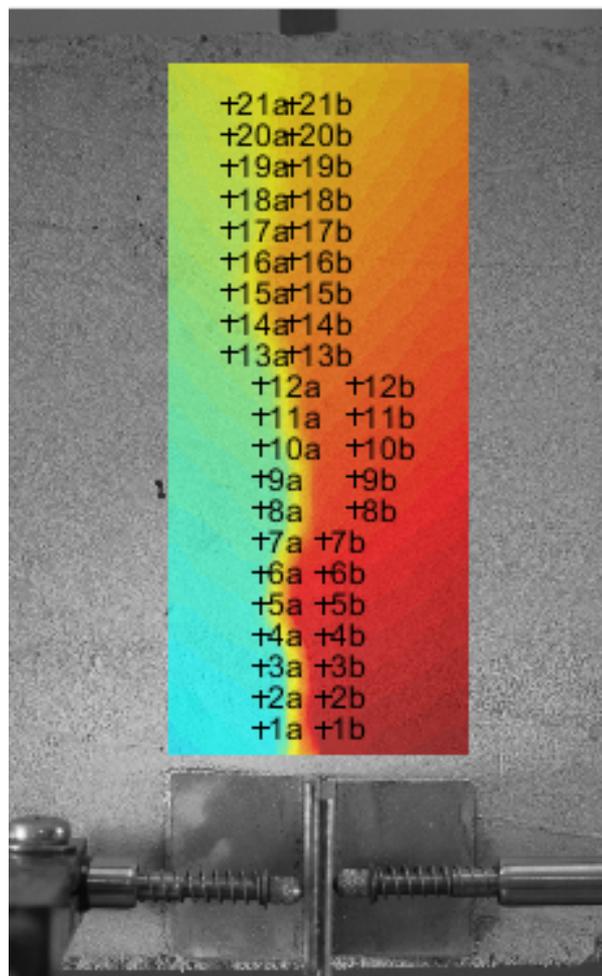
Figura 3.2 – Espécime prestes a iniciar o ensaio de flexão de três pontos.



Fonte: Autor (2021).

As imagens captadas são então utilizadas no software *open-source* de CID NCorr, onde as imagens retiradas após o início do ensaio são comparadas com uma retirada antes (imagem referência) e com isso medir o campo de deslocamentos em cada instante fotografado. Com os campos de correlação, extensômetros virtuais são formados com o *plugin* NCorr_post ao longo das fissuras para acompanhar os deslocamentos de abertura de fissura por completo, assim como mostrado na figura a seguir:

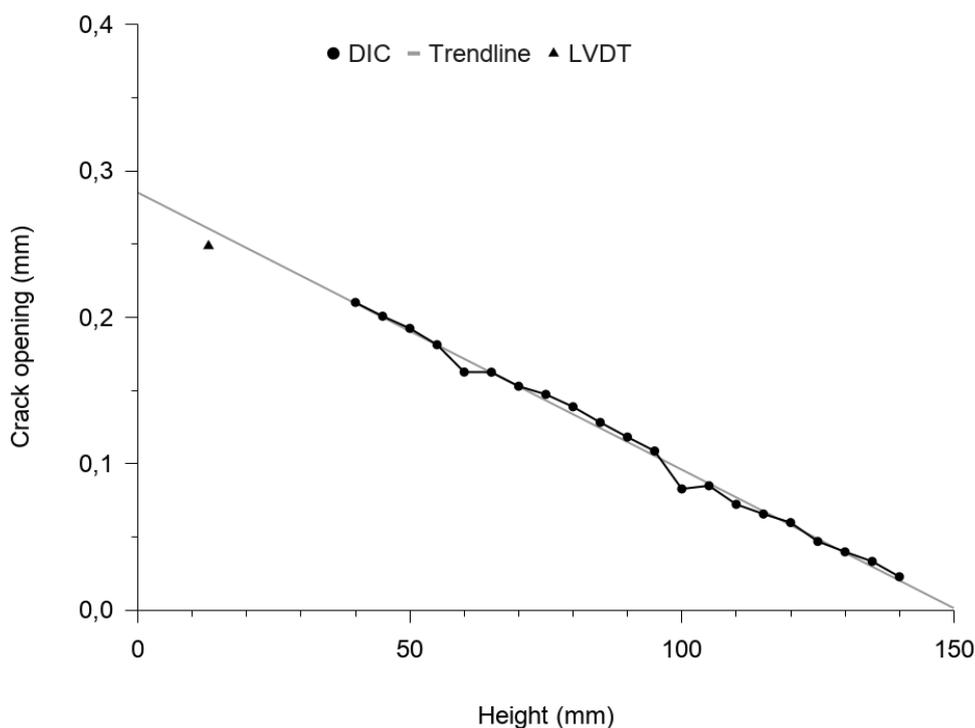
Figura 3.3 – Campo de deslocamentos medido pelo NCorr com extensômetros virtuais.



Fonte: Souza et al. (2020).

Como é visível nas figuras, as imagens retiradas não permitem as medições na parte mais inferior do entalhe, onde é necessário medir o CMOD. Assumindo que a abertura da fissura sempre é linear em relação à posição vertical de medição e utilizando os valores medidos pelos extensômetros, uma regressão linear é feita para estimar o valor de CMOD, como visto na seguinte figura:

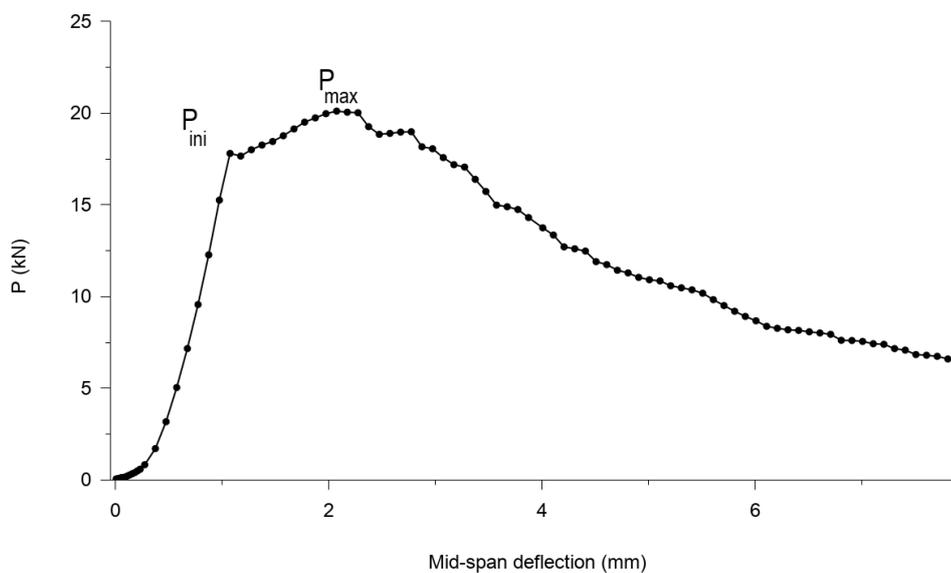
Figura 3.4 – Regressão linear dos dados de abertura ao longo da fissura.



Fonte: Souza et al. (2020).

Também empregando regressão linear, o valor da abertura na posição do LVDT é estimado, para posterior validação. O conjunto de todos os CMODs medidos em um espécime relacionado com os respectivos carregamentos de cada instante forma o gráfico P-CMOD. Ao avaliar a curva, é calculado o C_i , que é o inverso da inclinação inicial. Esta etapa pode ser a fonte da maior parte do erro do estudo, pois a determinação de C_i é feita de forma gráfica e é bastante sensível a quaisquer alterações nos valores de P ou CMOD e ao ponto escolhido para avaliação. De forma similar, ao avaliar a curva carregamento versus deflexão, os instantes de carregamento críticos são identificados. São eles o inicial, quando o espécime entra no regime plástico e o máximo, quando o espécime atinge sua sollicitação máxima antes de entrar em ruptura. A Figura 3.5 exemplifica o procedimento:

Figura 3.5 – Gráfico de carga versus deflexão.



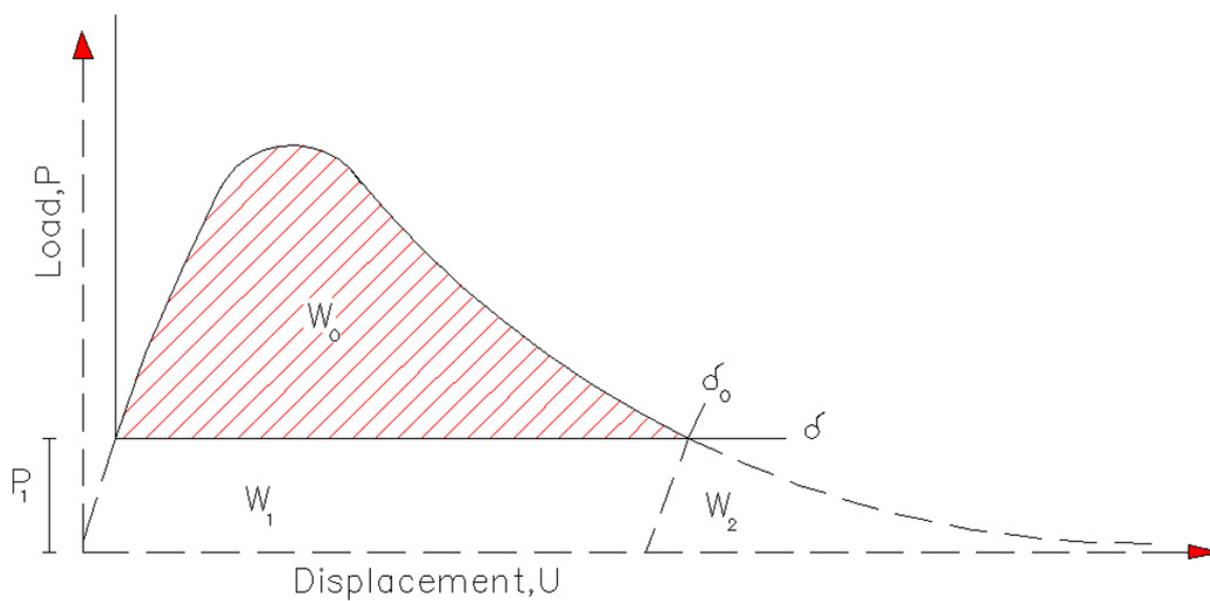
Fonte: Souza et al. (2020).

Devido à resistência residual do CRFA, o cálculo do trabalho W_t não pode ser feito de sua forma trivial, integrando a curva mostrada na Figura 3.5. Portanto, é necessário utilizar artifícios para tal cálculo. Segundo Khalilpour, BaniAsad e Dehestani (2019), o trabalho pode ser calculado por:

$$W_t = W_0 + 2(P_1\delta_0) \quad (10)$$

onde W_0 , P_1 e δ_0 são dados como ilustra a seguinte imagem:

Figura 3.6 – Curva carga-deflexão para cálculo do trabalho.



Fonte: Khalilpour, BaniAsad e Dehestani (2019) .

A partir deste ponto, todos os dados preliminares necessários para todos os cálculos já foram obtidos. Logo, o equacionamento mostrado na Seção 2.2 é aplicado para a obtenção dos resultados.

4 RESULTADOS

Esta seção, valida as medições realizadas, exprime os parâmetros e fenômenos de fraturamento observados, compara-os aos de vigas de concreto convencional e interpreta os resultados obtidos.

Tais resultados são comparados aos resultados obtidos por Yin, Qiao e Hu (2020) em seus EF3Ps realizados em vigas de concreto convencional. Apesar do estudo citado ter sido realizado em vigas de distintos tamanhos, a comparação é feita apenas com as nomeadas T3, que apresentam dimensões de 150mm de altura, 100mm de largura, 550mm de comprimento e 60mm de comprimento de entalhe.

É importante frisar que a comparação não é feita como forma de validação, visto que são utilizados materiais, largura e comprimento de entalhe diferentes dos utilizados neste trabalho. A comparação é feita apenas para ilustrar as diferenças em termos de escala entre os resultados obtidos em ambos os estudos, que não seriam explicados apenas pela diferença dimensional, permitindo que se avalie o material.

Além disso, devido a uma interrupção não esperada no ensaio realizado na viga 5, uma quantidade reduzida de dados pôde ser obtida do experimento. Isto afetou a qualidade da análise feita na mesma. Portanto, foi decidido retirar estes resultados do espaço amostral.

4.1 VALIDAÇÃO DAS MEDIÇÕES POR CID

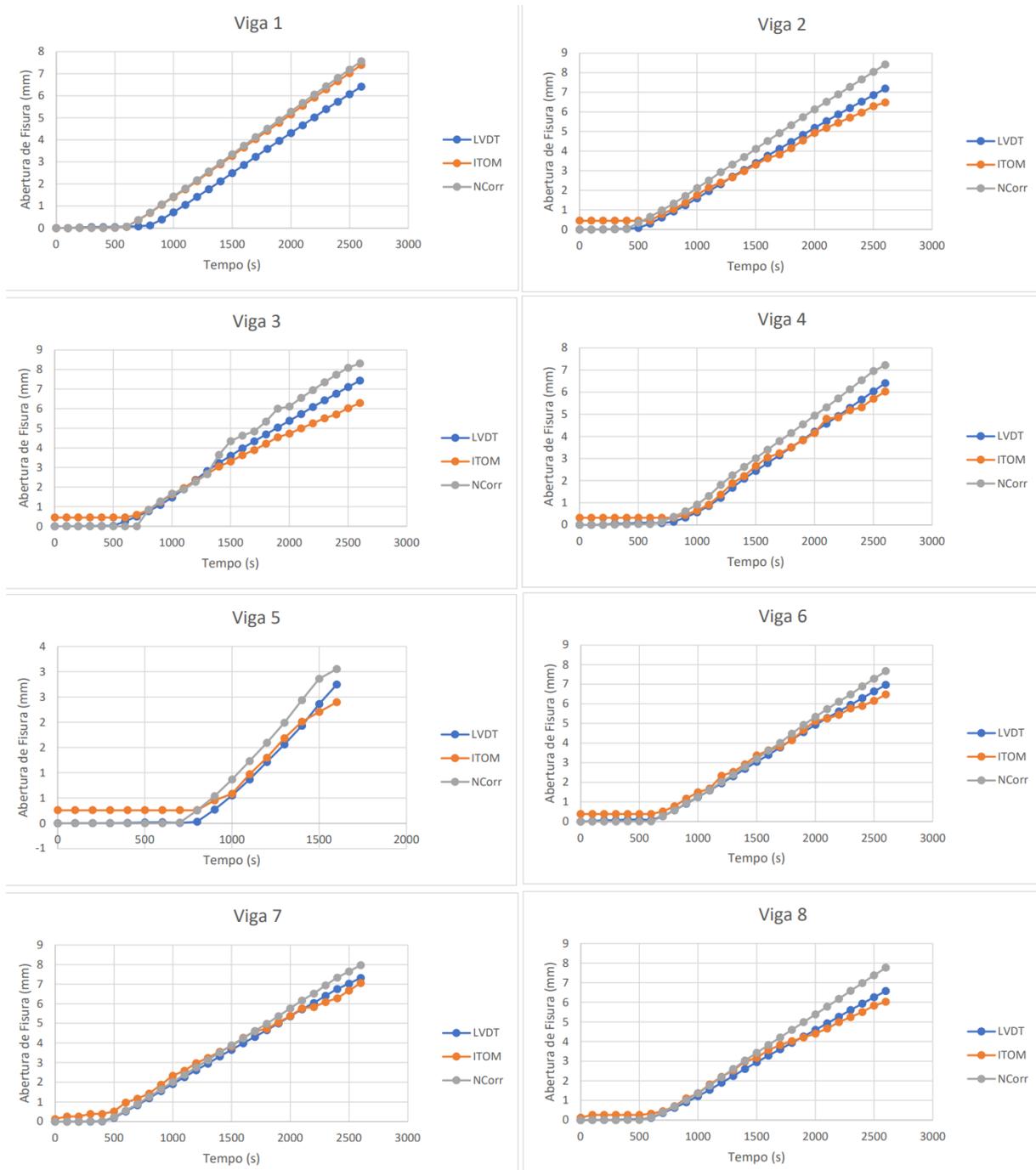
Inicialmente, os dados das medições do NCorr são validados por comparação com as medições do LVDT e com medições diretas por meio do software Itom (GRONLE et al., 2014). As medições diretas são feitas analisando a distância entre os pixels manualmente selecionados de cada lado da abertura do entalhe. As medições referentes ao Itom e ao LVDT foram realizadas para um estudo anterior encontrado em Oliveira (2019) e são aproveitadas neste trabalho. Os deslocamentos utilizados nesta comparação são apenas os referentes à abertura do entalhe na altura em que está posicionado o LVDT. As comparações são previstas na Figura 4.1.

Devido a problemas de contraste das imagens retiradas da viga 3 nos momentos críticos, o processo de correlação não pôde ser realizado com segurança neste caso. É possível observar como o padrão de abertura detectado pelo NCorr da viga 3 destoa da reta apresentada nas outras vigas. Portanto, ela não foi considerada nas análises realizadas.

Ao avaliar os gráficos de abertura pelo tempo, é possível notar a proximidade das medições de CID das outras. Após remoção dos segundos iniciais do ensaio devido aos pequenos deslocamentos que são mais suscetíveis a ruído e apresentam diferenças relativas tendentes ao infinito, a análise comparativa rende um desvio relativo percentual médio entre o NCorr e o LVDT de 18,845% e entre o NCorr e o Itom de 13,456%. Logo, é possível afirmar que os possíveis erros de medição de deslocamentos feitos pelo NCorr não devem ser significativos o

suficiente para comprometer os resultados.

Figura 4.1 – Comparação entre as medições do NCorr, LVDT e Itom.



Fonte: Autor (2021).

4.2 PARÂMETROS DE FRATURAMENTO

Após a aplicação da estratégia exposta no Capítulo 3, obtém-se os resultados almejados pelo objetivo do trabalho. As vigas 3 e 5 foram excluídas da análise por motivos citados

anteriormente. O Quadro 4.1 expressa todos os parâmetros de fraturamento aqui medidos ou calculados.

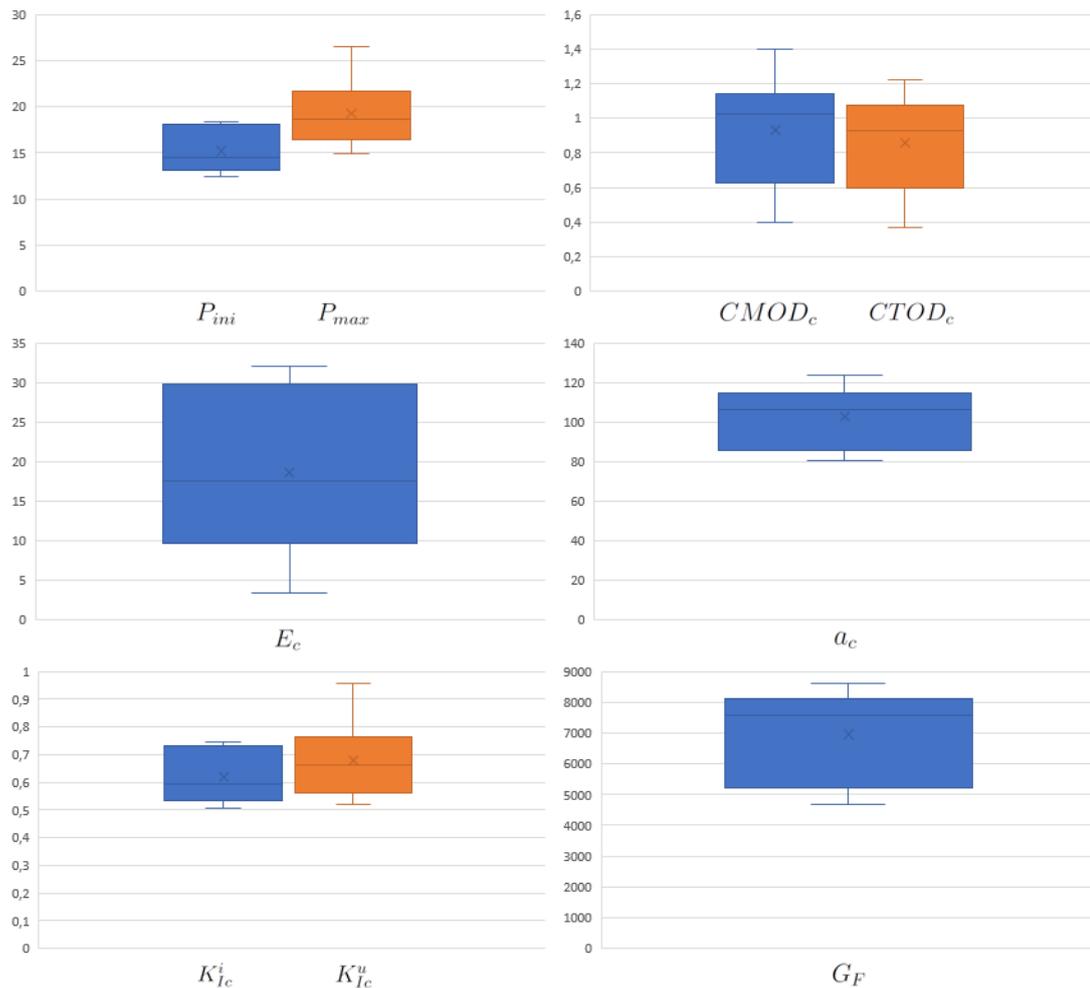
Quadro 4.1 – Parâmetros de fraturamento dos espécimes ensaiados.

Parâmetro	V1	V2	V4	V6	V7	V8
$P_{ini}(kN)$	17,913	13,345	18,345	15,277	12,383	13,777
$P_{max}(kN)$	20,027	19,595	26,495	16,864	14,968	17,764
$CMOD_c(mm)$	0,395	1,060	0,702	1,396	0,981	1,060
$CTOD_c(mm)$	0,367	0,966	0,674	1,225	0,896	1,027
$E_c(GPa)$	32,018	18,653	11,841	29,018	16,589	3,434
$a_c(mm)$	102,620	111,222	87,190	123,620	110,445	80,662
$K_{Ic}^i(MPa\sqrt{m})$	0,729	0,544	0,746	0,622	0,506	0,562
$K_{Ic}^u(MPa\sqrt{m})$	0,700	0,676	0,955	0,576	0,518	0,652
$G_F(kN/m)$	7963,40	5375,76	7252,71	7883,38	4673,21	8599,14

Fonte: Autor (2021).

Acompanhando os resultados expostos no quadro, notamos inicialmente uma grande variância entre o comportamento das vigas. Isto fica evidente ao analisar a variação de cada parâmetro de viga em viga, em especial do módulo de elasticidade E_c , que apresenta um valor de 57,343%. A Figura 4.2 expressa o diagrama de caixas de cada parâmetro. Apesar de todas as vigas terem passado pelo mesmo processo de moldagem e ensaio, a presença de fibras adiciona um fator aleatório nos resultados, visto que a resposta do espécime varia sensivelmente com fatores como a concentração e orientação das fibras. Isto pode explicar em parte o motivo de tal variação. Ao mesmo tempo, alguns valores parecem não ser característicos da amostra, como o $E_c = 3,434GPa$ resultante da viga 8, que indica que o método necessita de aprimoramento para a estimativa do módulo de elasticidade.

Figura 4.2 – Diagrama de caixas de cada parâmetro obtido.



Fonte: Autor (2021).

Outra observação é a elevada resistência à fratura apresentada pelo material. Isto é notado ao comparar estes dados com ambos carregamentos críticos P_{ini} e P_{max} , deslocamentos de abertura de fissura críticos $CMOD_c$ e $CTOD_c$, comprimento de fissura crítico a_c e especialmente energia de fratura G_F com valores obtidos de um concreto convencional, como pode ser visto no Quadro 4.2. No quadro citado é feita uma comparação entre a média dos resultados obtidos neste trabalho com a média dos resultados obtidos por Yin, Qiao e Hu (2020) com 4 vigas de concreto convencional de dimensões similares expressas anteriormente. É possível observar como os parâmetros citados são significativamente maiores, com destaque para a energia de fratura que é 45 vezes o valor referente ao concreto convencional. Além disso, a viga resistiu a um carregamento 2,8 vezes maior. Isto indica o quanto as fibras podem melhorar a habilidade das vigas de suportarem fissura do Modo I.

Além disso, os parâmetros relacionados aos instantes críticos se apresentam muito mais próximos entre si. Podemos observar que os parâmetros duplo-K destoam em apenas 10% para o CRFA, enquanto para o concreto convencional o valor é 147,6%. O mesmo se aplica aos

Quadro 4.2 – Comparação com os resultados obtidos por Yin, Qiao e Hu (2020)

Parâmetro	Autor	Yin, Qiao e Hu (2020)
$P_{ini}(kN)$	15,173	4,058
$P_{max}(kN)$	19,286	6,746
$CMOD_c(mm)$	0,932	0,056
$CTOD_c(mm)$	0,859	0,025
$E_c(GPa)$	18,592	39,902
$a_c(mm)$	102,627	79,905
$K_{Ic}^i(MPa\sqrt{m})$	0,618	0,613
$K_{Ic}^u(MPa\sqrt{m})$	0,680	1,518
$G_F(kN/m)$	6957,933	152,725

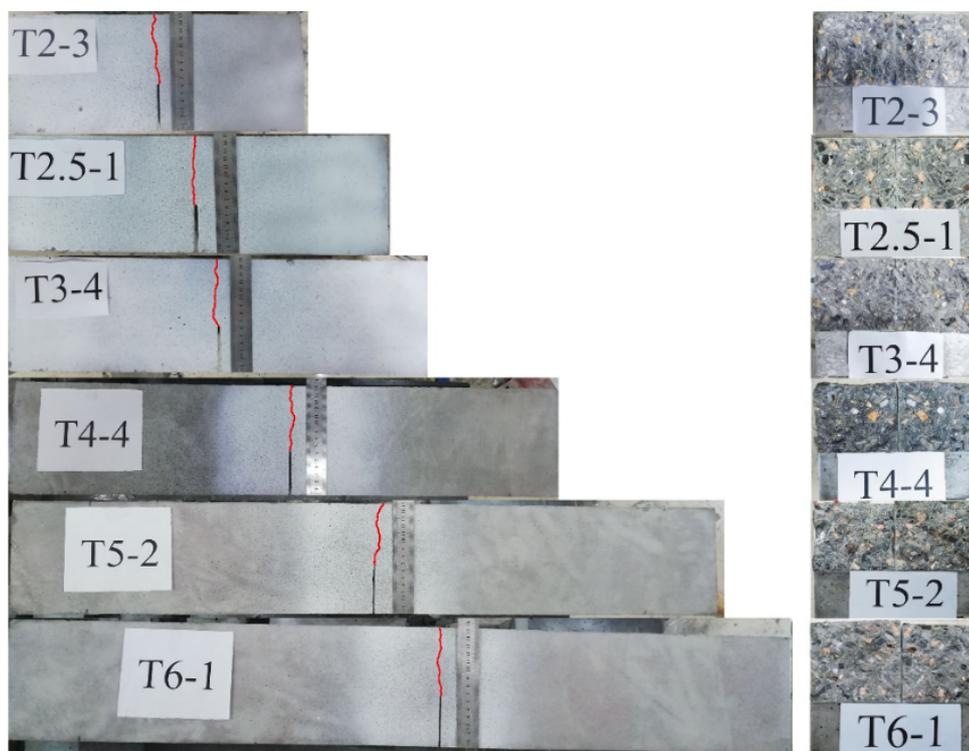
Fonte: Autor (2021).

carregamentos críticos, que para o CRFA crescem 27,1% e para o concreto normal crescem 66,2%. Isto pode ocorrer devido à deformação elástica das fibras após o início da deformação plástica do concreto.

4.3 PROPAGAÇÃO DE FISSURA

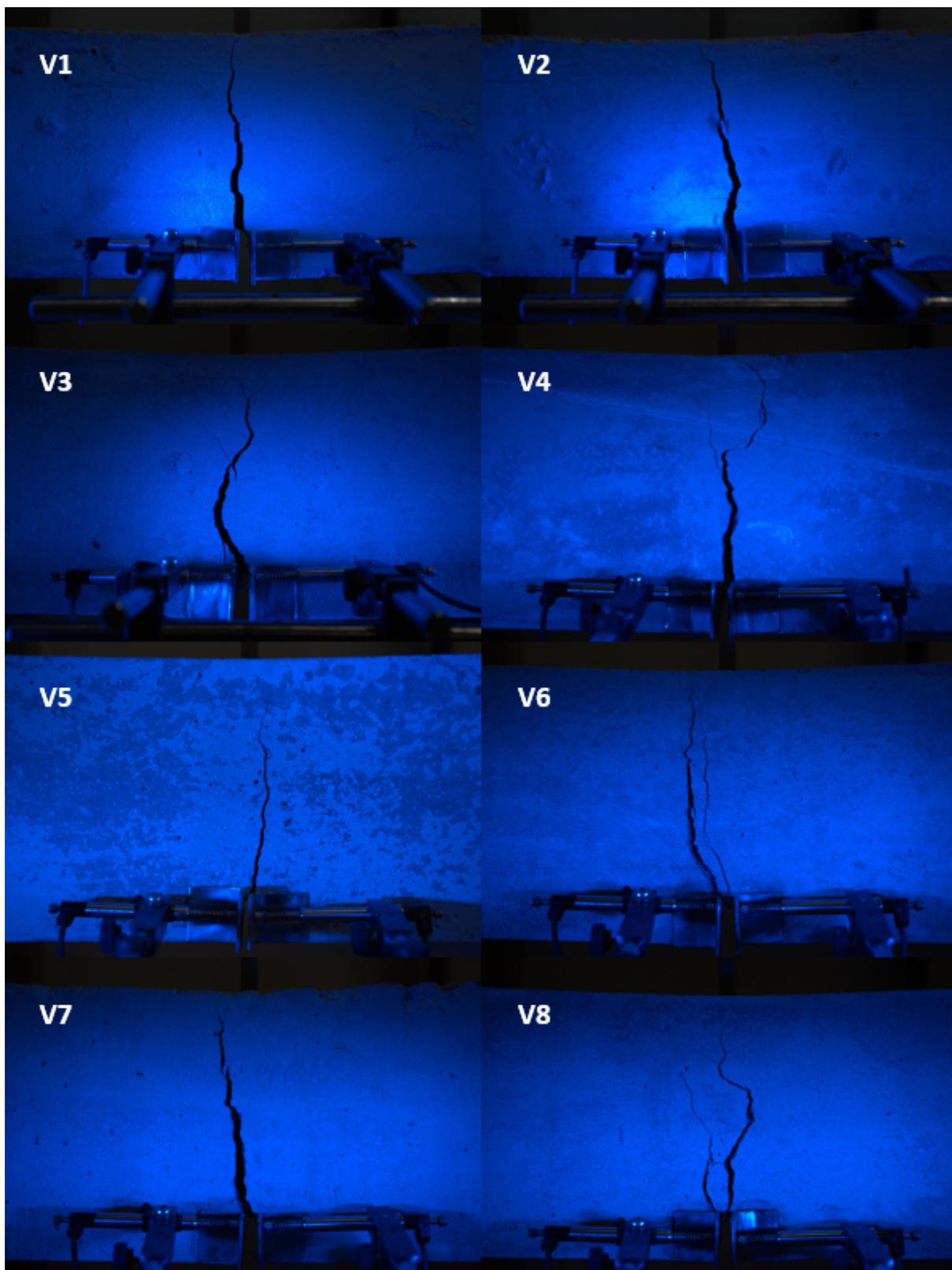
Por fim, ao observar o caminho traçado pelas fissuras, também é possível notar que é significativamente mais tortuoso. Isto pode ser resultado da fissura se propagando pelas regiões de menor resistência à tração, portanto evitando a presença das fibras. A Figura 4.3 exemplifica um típico padrão de fissuração presente em vigas de concreto convencional. Em contrapartida, a Figura 4.4 mostra o padrão observado nas vigas de CRFA ensaiadas por Oliveira (2019).

Figura 4.3 – Propagação de fissura típica de vigas de concreto.



Fonte: Yin, Qiao e Hu (2020).

Figura 4.4 – Propagação de fissura ocorrida nas vigas de CRFA.



Fonte: Autor (2021).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho explora uma metodologia para a obtenção de parâmetros de fratura de oito vigas de CFRA que passam pelo EF3P. Durante o experimento, os espécimes foram fotografados para medição dos campos de deslocamento via NCorr, um software *open-source* de CID. Ao observar a curva carregamento-deflexão, os instantes críticos dos ensaios foram detectados. O perfil de abertura de fissura ao longo das vigas foi feito ao aplicar extensômetros virtuais nos dados medidos por CID. Os deslocamentos medidos foram validados por meio de uma comparação com deslocamentos medidos por sensores LVDT e por medições diretas feitas com o software Itom. Os parâmetros de fratura foram inferidos pela formulação aqui presente, baseada no método proposto por Yin, Qiao e Hu (2020).

Os resultados obtidos neste estudo mostram os efeitos que o reforço por fibras de aço pode ter em vigas de concreto. É possível observar que as fibras melhoram as capacidades de suportar fissuras de Modo I, reduzem a diferença entre os instantes críticos de formação de fissura e tornam mais complexo o caminho de propagação da fissura. Além disso, bastante erro pode ter vindo de medições gráficas (C_i), ruído nas imagens e aproximações numéricas. Entretanto, estes fenômenos podem ser explicados de forma teórica e são documentados na literatura, como visto na seção 2.3. Também foi notada uma alta variedade nos parâmetros calculados entre as vigas. O motivo pelo qual isto se dá ainda não é claro, mas pode ser devido a leves diferenças na confecção das vigas.

A robustez, relativo baixo custo e praticidade das medições feitas por CID permite que esta metodologia seja viável, não apenas para este experimento específico, mas também para outros ensaios mecânicos. Portanto, esta metodologia pode ser adaptada para mais estudos dos efeitos do reforço por fibra no concreto e fenômenos de fratura, implicando num maior entendimento do comportamento mecânico das fraturas.

Referências

- ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2005. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- BLABER, J.; ADAIR, B.; ANTONIOU, A. Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. **Experimental Mechanics**, v. 55, n. 6, p. 1105–1122, 2015. ISSN 17412765. Citado 4 vezes nas páginas 8, 13, 15 e 16.
- BRUCK, H. A. et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. **Experimental Mechanics**, v. 29, n. 3, p. 261–267, 1989. ISSN 00144851. Citado na página 8.
- CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. **Experimental Mechanics**, v. 25, n. 3, p. 232–244, 1985. ISSN 17412765. Citado na página 8.
- EN 14651:2007. Test method for metallic fiber-reinforced concrete – measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (lop), residual). **European Committee for Standardization**, London, England, 2010. 15p. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 21.
- FERRARA, L. et al. A comprehensive methodology to test the performance of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFR-SCC). **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 37, p. 406–424, 2012. ISSN 09500618. Citado na página 19.
- FERRAZ, D. H. S. **Obtenção de campos de deslocamentos e deformações através de técnicas de correlação de imagens digitais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2013. Citado na página 9.
- GHAHREMANNEJAD, M. et al. Experimental investigation and identification of single and multiple cracks in synthetic fiber concrete beams. **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier Ltd., v. 9, p. e00182, 2018. ISSN 22145095. Citado na página 9.
- GIASSA, M. **III – Bicubic Spline Interpolation**. 2016. Disponível em: <https://www.giassa.net/?page_id=274>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2021. Citado na página 14.
- GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. Tese (Doutorado) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2002. Citado na página 21.
- GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. **Philosophical Transactions**, v. 221, p. 163–198, 1920. Citado na página 18.
- GRONLE, M. et al. Itom: an Open Source Metrology, Automation, and Data Evaluation Software. **Applied Optics**, v. 53, n. 14, p. 2974, 2014. ISSN 0003-6935. Citado na página 28.
- HE, Z. H. et al. Two-dimensional fluid-velocity measurements by use of digital-speckle correlation techniques. **Experimental Mechanics**, v. 24, n. 2, p. 117–121, 1984. ISSN 00144851. Citado na página 8.
- HOSSAIN, K. M. et al. Strength and fracture energy characteristics of self-consolidating concrete incorporating polyvinyl alcohol, steel and hybrid fibres. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 45, p. 20–29, 2013. ISSN 09500618. Citado na página 19.

- HUANG, H.; TALREJA, R. Numerical simulation of matrix micro-cracking in short fiber reinforced polymer composites: Initiation and propagation. **Composites Science and Technology**, v. 66, n. 15, p. 2743–2757, 2006. ISSN 02663538. Citado na página 20.
- IRWIN, G. R. Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminum alloys. **Sagamore Research Conference Proceedings**, v. 2, p. 289–305, 1956. Citado na página 18.
- KHALILPOUR, S.; BANIASAD, E.; DEHESTANI, M. A review on concrete fracture energy and effective parameters. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 120, n. January, p. 294–321, 2019. ISSN 00088846. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 26 e 27.
- KÜNTZ, M. et al. Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 33, n. 11, p. 1418–1425, 2006. ISSN 03151468. Citado na página 9.
- LECLERC, H. et al. Integrated Digital Image Correlation for the Identification of Mechanical Properties. p. 161–171, 2009. Citado na página 9.
- LUO, P. F. et al. Accurate measurement of three-dimensional deformations in deformable and rigid bodies using computer vision. **Experimental Mechanics**, v. 33, n. 2, p. 123–132, 1993. ISSN 00144851. Citado na página 8.
- MO, K. H. et al. The effect of steel fibres on the enhancement of flexural and compressive toughness and fracture characteristics of oil palm shell concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, v. 55, p. 20–28, 2014. ISSN 09500618. Citado na página 19.
- OLIVEIRA, K. C. da S. **Aplicação da correlação digital de imagens na análise de abertura de fissuras do CAARFA**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas. Citado 5 vezes nas páginas 9, 10, 22, 28 e 32.
- OLIVEIRA, K. C. S. et al. Modelo de correlação de imagens digitais aplicado à avaliação do comportamento de crfa. In: IBRACON. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- OLIVEIRA, K. C. S. et al. Aplicação da correlação de digital de imagens no estado de formação de fissuras do crfa. In: IBRACON. **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto**. Fortaleza, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 9, 21 e 22.
- PAN, B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement. **Applied Optics**, v. 48, n. 8, p. 1535–1542, 2009. ISSN 15394522. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 16.
- PAN, B. Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. **Measurement Science and Technology**, IOP Publishing, v. 29, n. 8, p. 082001, aug 2018. ISSN 0957-0233. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 12.
- PETERS, W. H.; RANSON, W. F. Digital Imaging Techniques In Experimental Stress Analysis. **Optical Engineering**, v. 21, n. 3, jun 1982. ISSN 0091-3286. Citado na página 8.
- REU, P. L. et al. **DIC Challenge: Developing Images and Guidelines for Evaluating Accuracy and Resolution of 2D Analyses**. [S.l.]: Experimental Mechanics, 2018. v. 58. 1067–1099 p. ISSN 17412765. ISBN 1134001703. Citado na página 8.

RILEM TC 162 TDF. Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced concrete. Design of Steel Fibre Reinforced Concrete using the s-w method: Principles and Applications. **Materials and Structures**, v. 35, p. 262–278, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

SCHREIER, H. W. Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation. **Optical Engineering**, v. 39, n. 11, p. 2915, nov 2000. ISSN 0091-3286. Citado na página 8.

SCHREIER, H. W.; SUTTON, M. A. Systematic errors in digital image correlation due to undermatched subset shape functions. **Experimental Mechanics**, v. 42, n. 3, p. 303–310, 2002. ISSN 00144851. Citado na página 8.

SMITH, T. S.; BAY, B. K.; RASHID, M. M. Digital volume correlation including rotational degrees of freedom during minimization. **Experimental Mechanics**, v. 42, n. 3, p. 272–278, 2002. ISSN 00144851. Citado na página 8.

SMRKIĆ, M. F.; KOŠČAK, J.; DAMJANOVIĆ, D. Application of 2D digital image correlation for displacement and crack width measurement on RC elements. **Gradjevinar**, v. 70, n. 9, p. 771–781, 2018. ISSN 13339095. Citado na página 9.

SOROUSHIAN, P. et al. Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 1, p. 67–78, 1998. ISSN 09589465. Citado na página 19.

SOUZA, K. T. L. M.; Escarpini Filho, R. S.; Várady Filho, C. A. F. Use of digital image correlation and finite element method to solve inverse problem using displacement fields. In: **ABMEC. Proceedings of the XL Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Natal, 2019. Citado na página 9.

SOUZA, K. T. L. M. et al. Fracture properties analysis of steel fiber reinforced concrete using digital image correlation. In: **ABMEC. Proceedings of the XLI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Foz do Iguaçu, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 9, 24, 25 e 26.

SUN, Y. et al. Finite element formulation for a digital image correlation method. **Applied Optics**, v. 44, n. 34, p. 7357–7363, 2005. ISSN 0003-6935. Citado na página 8.

SUTTON, M. et al. Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. **Image and Vision Computing**, v. 4, n. 3, p. 143–150, 1986. ISSN 02628856. Citado na página 8.

VISINTIN, P. et al. Mechanics-Based Hinge Analysis for Reinforced Concrete Columns. **Journal of Structural Engineering**, v. 139, n. 11, p. 1973–1980, 2013. ISSN 0733-9445. Citado na página 19.

VÁRADY FILHO, C. A. F. **Um ambiente computacional de alto desempenho para cálculo de deslocamentos usando correlação de imagens digitais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016. Citado na página 9.

YIN, Y.; QIAO, Y.; HU, S. Determining concrete fracture parameters using three-point bending beams with various specimen spans. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Elsevier, v. 107, n. September 2019, p. 102465, 2020. ISSN 01678442. Citado 9 vezes nas páginas , 9, 11, 18, 28, 31, 32, 33 e 35.