



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

MÉTODO CID APLICADO NA CALIBRAÇÃO DE MODELO MEF DE DESCOLAMENTO DE INTERFACE COESIVA ROCHA-ARGAMASSA

EDIVALDO JOSÉ DA SILVA JUNIOR

Foz do Iguaçu
2021



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO
(ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO Em
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

MÉTODO CID APLICADO NA CALIBRAÇÃO DE MODELO MEF DE DESCOLAMENTO DE INTERFACE COESIVA ROCHA-ARGAMASSA

EDIVALDO JOSÉ DA SILVA JUNIOR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam
Coorientador: Prof. Dr. Julio Florez Lopez

Foz do Iguaçu
2021

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Aref Kalilo Lima Kzam
UNILA

Prof. Dr. Ricardo Antonio Picón Rodríguez
Universidad de Los Andes

Prof. Dr. David Leonardo Nascimento de Figueiredo Amorim
Universidade Federal de Sergipe

Foz do Iguaçu, 23 de Agosto de 2021.

Catalogação elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação
Catalogação de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

S586m

Silva Junior, Edivaldo José.

Método CID aplicado na calibração de modelo MEF de descolamento de interface coesiva rocha-argamassa /
Edivaldo José da Silva Junior. - Foz do Iguaçu, 2021.

80 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia,
Infraestrutura e Território (ILATIT), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPG ECI).

Orientador: Dr. Aref Kalilo Lima Kzam.

Coorientador: Dr. Julio Florez Lopez.

1. Engenharia de estruturas. 2. Construção de concreto. I. Kzam, Aref Kalilo Lima. II. Lopez, Julio Florez. III.
Título.

CDU 624.012.45

RESUMO

Na engenharia civil, a estabilidade de muitas estruturas depende das propriedades físicas do contato entre o concreto assentado na superfície rochosa de fundação. Normalmente, são estruturas críticas de grande importância para a sociedade, como por exemplo: pontes, túneis e barragens. Dessa forma, o comportamento cisalhante de juntas rocha-concreto é um fator que afeta a estabilidade estrutural. O método de zonas coesivas (MZC), permite simular o início da formação de uma fissura e a sua propagação, sem a necessidade de se saber onde a trinca está ou iniciará. Dessa forma, neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico capaz de simular a falha por descolamento interfacial do contato entre uma estrutura formada pelo assentamento de argamassa em uma superfície rochosa de granito. A calibração do modelo numérico foi realizada por meio dos resultados de um ensaio experimental de compressão simples em um bloco de rocha em contato com a argamassa por meio de uma interface inclinada. O monitoramento do ensaio foi realizado utilizando uma câmera digital de alta resolução. Os dados foram processados utilizando o método de correlação de imagens digitais (CID) para a obtenção de dados de deslocamento e deformação. Os resultados CID foram utilizados para calibrar o modelo numérico não linear do ensaio utilizando o método bilinear de zona coesiva nos elementos de contato interfacial rocha-argamassa. Por meio de uma análise paramétrica, determinou-se os parâmetros da lei bilinear (Tensão máxima de tração, deslocamento crítico e taxa de danificação). Estimou-se também, indiretamente, a taxa de liberação de energia de deformação crítica da ruptura do contato.

Palavras-chave: Ruptura interfacial; CID; MEF; Zona coesiva; Lei Bilinear.

ABSTRACT

In civil engineering, the stability of many structures depends on the physical properties of the contact between the concrete seated on the rocky foundation surface. Usually, they are critical structures of great importance to society, such as: bridges, tunnels and dams. Thus, the shear behavior of rock-concrete joints is a key factor of the structural stability. The method of cohesive zones (CZM) allows to simulate the beginning of the formation of a crack and its propagation, without knowing the crack location or when it will start. Thus, in this work, a numerical model was developed capable of simulating the failure due to interfacial delamination of the contact between a structure formed by mortar seated on a rocky granite leaning surface. The calibration of the numerical model was performed using the results of an experimental test of simple compression on a block of rock in contact with the mortar by an inclined interface. The test was monitored using a high resolution digital camera. The data were processed using the digital image correlation method (DIC) to obtain displacement and deformation data. The DIC results were used to calibrate the nonlinear numerical model of the test using the bilinear method of cohesive zone in the rock-mortar interfacial contact elements. By a parametric analysis, the parameters of the bilinear law were determined (Maximum tensile stress and critical displacement and damage rate). Indirectly, the rate of release of energy of critical deformation from the rupture of the contact was also estimated.

Key words: Interfacial Crack. DIC. FEA. Cohesive Zone. Bilinear law.

抽象的

在土木工程中，许多结构的稳定性取决于位于岩石基础表面的混凝土之间接触的物理特性。通常，它们是对社会非常重要的关键结构，例如：桥梁、隧道和水坝。因此，岩石混凝土节点的剪切行为是结构稳定性的关键因素。内聚区方法(CZM) 允许模拟裂纹形成的开始及其扩展，而无需知道裂纹位置或何时开始。因此，在这项工作中，开发了一个数值模型，能够模拟由于砂浆固定在岩石表面上形成的结构之间的接触界面分层而导致的失效。数值模型的校准是使用通过倾斜界面对与砂浆接触的一块岩石进行简单压缩的实验测试结果进行的。使用高分辨率数码相机监控测试。使用数字图像相关方法(DIC) 处理数据以获得位移和变形数据。DIC 结果用于在岩石和砂浆界面接触中使用内聚区法的双线性定律校准试验的非线性数值模型。通过参数分析，确定了双线性定律的参数（最大拉伸应力和临界位移和损坏率）。还间接地估计了接触破裂导致的临界变形能量的释放速率。

关键词：界面裂纹。数字图像相关。有限元分析。内聚带。双线性定律。

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	METODOLOGIA	14
2.1.	ETAPA 1	14
2.1.1.	Revisão Bibliográfica	14
2.1.2.	Fundamentação Teórica	15
2.1.3.	Delimitação do Escopo e o desenvolvimento da Metodologia	15
2.2.	ETAPA 2	16
2.2.1.	Preparação do Ensaio Experimental	16
2.2.2.	Mapeamento dos campos de Deformações por Meio do Método CID	18
2.3.	ETAPA 3	18
2.3.1.	Desenvolvimento de um modelo numérico para simular o ensaio	18
2.3.2.	Calibração do modelo utilizando os dados experimentais (CID)	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
4.1.	MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA LINEAR	23
4.1.1.	FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO	23
4.1.2.	TAXA DE LIBERAÇÃO DE ENERGIA DE DEFORMAÇÃO	25
4.1.3.	TÉCNICA DE FECHAMENTO DE FISSURA VIRTUAL (TFFV)	26
4.1.4.	TÉCNICA INTEGRAL J	27
4.1.5.	MECÂNICA DA FRATURA INTERFACIAL.....	28
4.1.6.	MODO MISTO PARA FRATURAS INTERFACIAIS	29
4.2.	MODELO DE ZONA COESIVA.....	29
4.2.1.	FRATURAMENTO DE ZONA COESIVA.....	29
4.2.2.	LEI BILINEAR DE SEPARAÇÃO POR TRAÇÃO	31
4.2.3.	IMPLEMENTAÇÃO DO MODO MISTO DE FRATURA DA LEI BILINEAR.....	32
4.3.	CID – CORRELAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS.....	33
4.3.1.	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA.....	34
4.3.2.	PROCESSAMENTO DOS DADOS	37
5.	ENSAIO DE FALHA DE CONTATO INTERFACIAL ROCHA-ARGAMASSA	44
5.1.	PREPARAÇÃO DA ROCHA	44
5.2.	PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA.....	44
5.3.	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA ROCHA-ARGAMASSA	46
6.	MONITORAMENTO DO ENSAIO PELO MÉTODO CID.....	47
6.1.	PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA (TEXTURA)	47
6.2.	PROCESSAMENTO DO ENSAIO	47
6.3.	PÓS-PROCESSAMENTO CID (RESULTADOS).....	49
6.3.1.	TABULAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	51
7.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RUPTURA INTERFACIL ROCHA E ARGAMASSA	54

7.1.	ANÁLISE ESTRUTURAL ELÁSTICA LINEAR.....	55
7.2.	ANÁLISE ESTRUTURAL NÃO LINEAR DE CONTATO (ZONA COESIVA – LEI BILINEAR) ..	60
7.2.1.	COMPORTAMENTO DA INTERFACE DE CONTATO (ZONA COESIVA – LEI BILINEAR) ..	70
7.2.2.	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA ZONA COESIVA.....	72
8.	CONCLUSÕES	73
9.	REFERÊNCIAS.....	76

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma das etapas e as principais atividades realizadas neste trabalho	14
Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada neste trabalho.....	16
Figura 3 – Ilustração do corpo de prova rocha-argamassa	17
Figura 4 – Ilustração do rompimento do contato rocha-argamassa do corpo de prova	17
Figura 5 – Principais modos de deslocamentos de superfícies de trincas.	23
Figura 6 – Concentração de tensões na frente da fratura	24
Figura 7 – Malha de uma fissura baseada TFFV	26
Figura 8 – Fissura na superfície de contato entre dois materiais diferentes	28
Figura 9 – Separação interfacial de MZC.....	30
Figura 10 – Leis de separação por tração para MZC: (a) Bilinear, (b) exponencial, (c) trapezoidal e (d) trilinear.....	30
Figura 11 – Lei de separação por tração bilinear para elementos de zona coesiva.....	31
Figura 12 – Ilustração das etapas CID e os parâmetros que envolvem cada uma delas.....	34
Figura 13 – Detalhes da textura de um ensaio CID	35
Figura 14 – Esquema geral da captura de imagens para ensaios CID Tridimensional	36
Figura 15 – Ilustração de uma imagem digital e a sua respectiva matriz de pixels.....	38
Figura 16 – Ilustração da determinação da área de interesse de um ensaio CID.....	39
Figura 17 – representação discreta das intensidades de pixels de um bloco	40
Figura 18 – Imagem de referência com textura e sua respectiva matriz de intensidade de pixels (a) e a imagem seguinte com a identificação da nova posição do bloco (b).....	41
Figura 19 – Ilustração da correspondência entre blocos pelo método de Newton-Raphson	43
Figura 20 – Principais dimensões da amostra de rocha	44
Figura 21 – Determinação da consistência da argamassa pelo ensaio de abatimento.....	45
Figura 22 – Moldagem dos corpos de prova.....	45
Figura 23 – Moldagem da argamassa na superfície inclinada da rocha	46
Figura 24 – Corpo de prova rocha-argamassa recém-desmoldado	46
Figura 25 – Preparação da textura dos corpos de prova rocha-argamassa.....	47
Figura 26 – Equipamentos laboratoriais utilizados na realização do ensaio	47
Figura 27 – Câmera digital Sony a5000	48
Figura 28 – Equipamentos utilizados para o monitoramento da superfície de interesse	48
Figura 29 – Delimitação da área de interesse e análise da qualidade da textura	49
Figura 30 – Registro do carregamento e fotografia do momento de ruptura do corpo de prova.....	50
Figura 31 – Imagens CID e gráfico de carregamento no tempo	50
Figura 32 – Tipos de ruptura obtidas durante os ensaios: ruptura parcial da interface (a), ruptura total de forma suave (b) e, ruptura total de forma abrupta (c)	51
Figura 33 – Pontos de monitoramento (CID)	52
Figura 34 – Resultados CID (campo de deslocamento vertical, pontos de monitoramento e gráficos de deslocamento e deformação do ponto 3) do corpo de prova CP-RA-02.....	52
Figura 35 – Configuração da zona coesiva na biblioteca de materiais do Ansys 19.2	54

Figura 36 – Ilustração gráfica da Lei Bilinear de zona coesiva para o Modo II	55
Figura 37 – Malha hexaédrica do modelo numérico	56
Figura 38 – Condição de contorno do modelo numérico	56
Figura 39 – Condição de carregamento do modelo numérico de acordo com ensaio experimental... 57	
Figura 40 – Campo de deslocamento e tensão vertical (t=64s)	58
Figura 41 – Campo de deslocamento e tensão horizontal (t=64s)	58
Figura 42 – Gráfico de deslizamento e campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato	59
Figura 43 – Análise de deslizamento da interface de contato obtido pelo método CID.....	59
Figura 44 – Ilustração gráfica da Lei Bilinear parcialmente preenchida	60
Figura 45 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=0s)	61
Figura 46 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=20s)	62
Figura 47 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=40s)	62
Figura 48 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=64,2s)	63
Figura 49 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=65,1s)	63
Figura 50 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=0s)	64
Figura 51 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=20s)	64
Figura 52 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=40s)	65
Figura 53 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=64,2s) ...	65
Figura 54 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=65,1s) ...	66
Figura 55 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=20s).....	66
Figura 56 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=40s).....	67
Figura 57 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=64,2s).....	67
Figura 58 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=65s).....	68
Figura 59 – Campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato (t=45,4s).....	70
Figura 60 – Campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato (t=64,2s).....	71
Figura 61 – Ilustração gráfica da lei bilinear completa com dados do método CID e MEF	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Traço da argamassa utilizada	45
Tabela 2- Características técnicas da câmera digital	48
Tabela 3 – Dados de ensaio dos corpos de prova rocha-argamassa	51
Tabela 4- Propriedades dos materiais	55
Tabela 5 – Principais grandezas apresentadas no resultado do modelo elástico linear	57
Tabela 6 - Resumo da análise paramétrica realizadas para calibrar o modelo numérico.....	61
Tabela 7 - Erro MAPE dos pontos de monitoramento	69
Tabela 8 - Parâmetros da Lei Bilinear.....	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Deslocamento vertical e horizontal do ponto 1 de monitoramento do CP-RA-02.....	53
Gráfico 2 – Deslocamento vertical e horizontal do ponto 2 de monitoramento do CP-RA-02.....	53
Gráfico 3 – Deslocamento vertical e horizontal do ponto 3 de monitoramento do CP-RA-02.....	53
Gráfico 4 – Deslocamentos vertical e horizontal do ponto 1 de monitoramento	68
Gráfico 5 – Deslocamentos vertical e horizontal do ponto 2 de monitoramento	69
Gráfico 6 – Deslocamentos vertical e horizontal do ponto 3 de monitoramento	69
Gráfico 7 – Deslizamento da interface de contato e detalhe no momento em que inicia o comportamento não linear	70

1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil, a estabilidade de muitas estruturas depende das propriedades físicas do contato concreto-rocha. Normalmente, são estruturas críticas de grande importância para a sociedade, como por exemplo: pontes, túneis e barragens. Dessa forma, o comportamento cisalhante de juntas formadas pelo assentamento de concreto em uma interface rochosa é o fator chave que afeta a estabilidade estrutural devido ao deslocamento do concreto, seja pela abertura da fratura (modo I) ou pelo deslizamento no sentido longitudinal da fratura (modo II) ou até mesmo, uma superposição de ambos os modos (modo misto).

No caso das barragens, uma das principais etapas de projeto é a análise de estabilidade global, que corresponde à verificação das tensões atuantes ao longo de potenciais planos de ruptura no corpo da estrutura, no contato entre a barragem e a fundação e no contato entre as diferentes camadas rochosas que compõe a fundação (ELETROBRÁS, 2003).

Os ensaios experimentais para simular o comportamento das estruturas de grande porte podem não apresentar resultados confiáveis devido ao efeito escala que ocorre quando se realiza um experimento geometricamente reduzido. Nesse contexto, a simulação numérica estrutural permite avaliar o comportamento linear e não linear em escala real de estruturas complexas devido aos avanços tecnológicos computacionais.

Porém, os resultados obtidos a partir de modelos numéricos nem sempre são compatíveis com o comportamento da estrutura real ou dos ensaios experimentais. Isso ocorre devido à dificuldade de se obter dados instrumentais de monitoramento, seja pela sua inexistência ou pela complexidade do ensaio.

Dessa forma, o método de Correlação de Imagens Digitais (CID) é apresentado como uma alternativa capaz de conectar os resultados dos ensaios experimentais e as simulações numéricas permitindo a calibração e validação desses modelos.

O método CID permite a obtenção de grandezas físicas por meio das imagens digitais, sem a necessidade de contato com o material ensaiado. Este método permite a determinação dos deslocamentos e deformações dos objetos investigados, em espaços bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), a partir de imagens de alta resolução que são registradas durante a mudança de localização ou forma dos objetos examinados por meio da variação do pixel da imagem. O método CID oferece uma ampla faixa de

sensibilidade e resolução para a medição. Possui diversas aplicações como: análise estrutural de juntas, ensaios de objetos durante o processo de fraturamento, detecção de dano, entre outras (ALMEIDA, 2014).

No caso das juntas formadas pelo assentamento de concreto em rocha, a aderência que ocorre durante a cura e o endurecimento do concreto, cria uma resistência coesiva no contato impedindo o seu deslocamento.

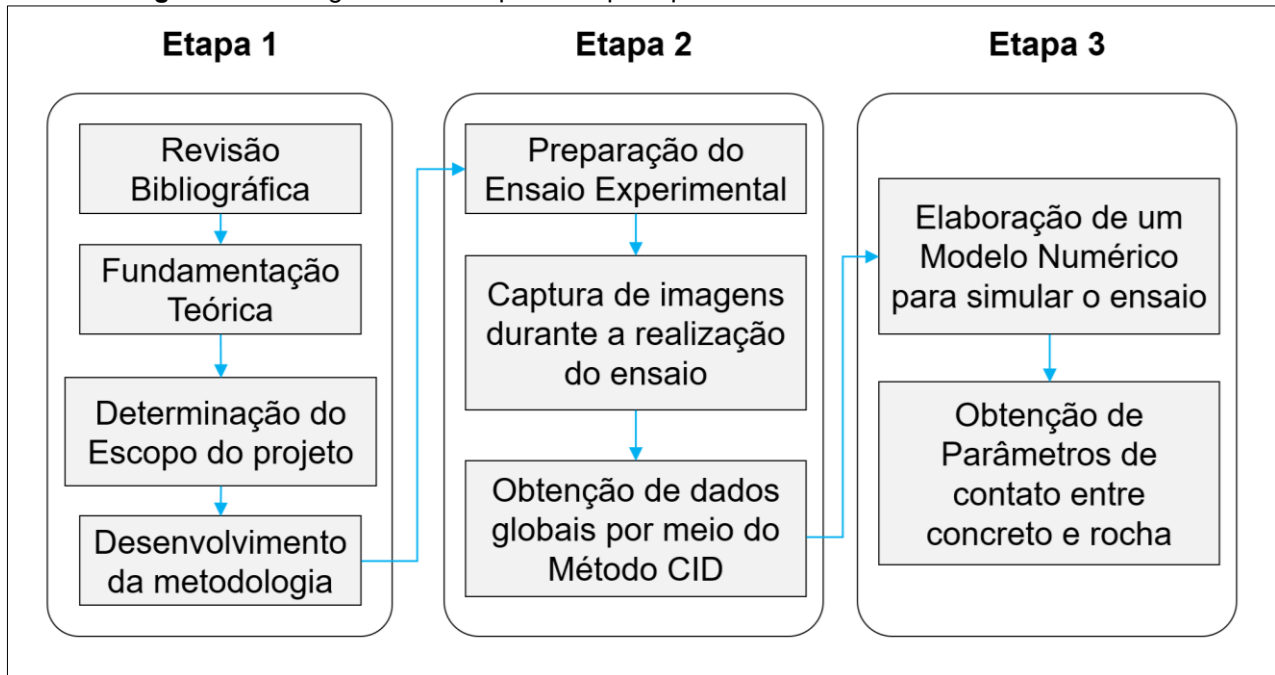
A mecânica da fratura tem sido utilizada para avaliar a resistência de interfaces e analisar a propagação de descolamento considerando fissuras iniciais. Porém, nesse tipo de problema de engenharia, a localização, o tamanho ou até mesmo a existência das fissuras iniciais não são conhecidos. Para superar essas limitações, a modelagem da zona coesa tem sido utilizada como um método alternativo e eficiente para analisar o descolamento dessa interface. Assim, o método de zonas coesivas (MZC) permite modelar a propagação de trincas e descolamento de juntas sem a necessidade de uma trinca pré-existente. As análises de zona coesa podem prever os locais e direções das fissuras iniciais ou simular geometrias complexas com mais de um tipo de interface. Em um modelo de ZC, os elementos são colocados ao longo da interface dos materiais. A deformação e separação desses elementos sob condições de carregamento de modo misto são guiadas por leis de separação de tração (Krieger, 2014).

Dessa forma, neste trabalho foi desenvolvido um modelo numérico capaz de simular a falha por descolamento no contato entre uma estrutura formada pelo assentamento de argamassa em uma superfície rochosa de granito. A calibração do modelo numérico foi realizada por meio dos resultados de um ensaio experimental de compressão simples em um bloco de rocha em contato com a argamassa por meio de uma interface com inclinação de 45° . Dessa forma, a junta experimentou solicitações normais de compressão e também, solicitações tangenciais. O ensaio foi filmado utilizando uma câmera de alta resolução. Posteriormente, realizou-se o processo de correlação de *frames* (imagens digitais) para se obter os campos de deformações e deslocamentos do ensaio. Os resultados foram utilizados para calibrar o modelo numérico não linear do ensaio. Uma vez validado, foi possível estimar diversos parâmetros diretos de juntas coesivas como por exemplo: Tensão máxima de tração e deslocamento crítico. Estimou-se também, indiretamente, a taxa de liberação de energia de deformação, fator da mecânica da fratura elástica linear.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho. Na Figura 1 é apresentado o fluxograma que ilustra as etapas e as atividades realizadas.

Figura 1 – Fluxograma das etapas e as principais atividades realizadas neste trabalho



Fonte: O autor.

A descrição de cada etapa e das principais atividades são apresentadas nos itens subsequentes.

2.1. ETAPA 1

Esta etapa envolve a familiarização com o tema por meio de trabalhos realizados e pelo estudo das diversas áreas envolvidas.

2.1.1. Revisão Bibliográfica

Visando o embasamento do desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas diversas leituras buscando embasar o presente trabalho com a teoria necessária. Assim, no primeiro momento, a pesquisa se limitou na busca de documentos referentes ao tema via internet, em base de dados confiáveis e em livros, como por exemplo: *Elsevier Journal*, *Science Direct*, *Scielo* e sites oficiais do governo. Foram utilizados também, artigos, teses e dissertações de pesquisadores da área.

2.1.2. Fundamentação Teórica

Para a realização deste trabalho, diferentes áreas do conhecimento são envolvidas. O domínio desses temas é essencial para se alcançar os resultados. Assim, durante a realização da revisão bibliográfica, constatou-se a necessidade de se aprofundar no conhecimento de alguns temas. Dessa forma, realizou-se a fundamentação teórica sobre:

- Mecânica da fratura;
- Zonas Coesivas
- Método de Correlação de Imagens digitais;
- Análise Numérica Computacional não linear de contato.

2.1.3. Delimitação do Escopo e o desenvolvimento da Metodologia

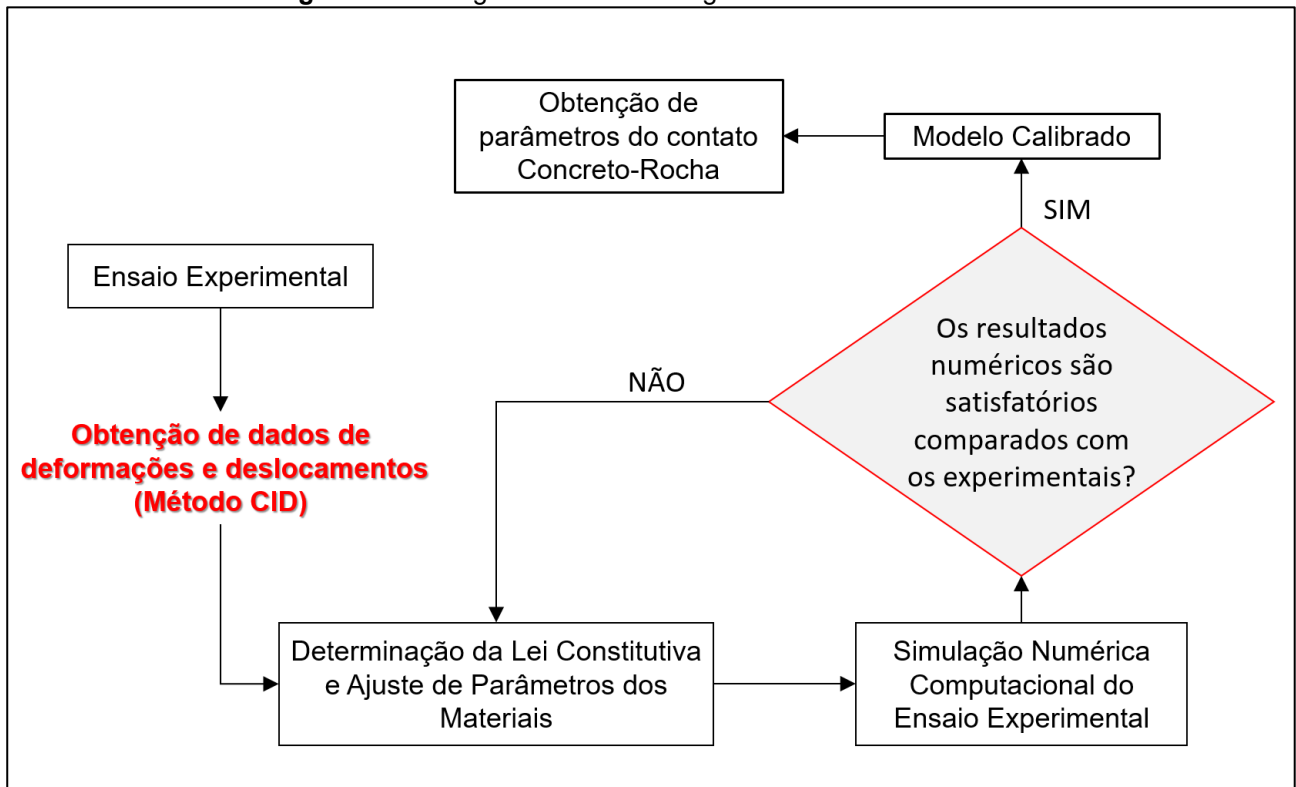
O objetivo deste trabalho é calibrar um modelo numérico não linear de ruptura interfacial no contato rocha-argamassa, por meio de resultados de correlação de imagens digitais (CID) de um ensaio experimental, monitorado por uma câmera de alta resolução.

Dessa forma, este trabalho envolveu a construção de corpos de prova prismáticos de rocha e argamassa (CP-RA), para a realização de um ensaio de ruptura de contato por meio de solicitações cisalhantes.

As superfícies dos corpos de prova receberam uma textura granular aleatória de cor preta em contrastes com a cor branca, para auxiliar na captura e correlação das imagens do ensaio por meio de uma câmera fotográfica de alta resolução.

Posteriormente, aplicou-se o método de correlação de imagens digitais nas imagens de vídeo do ensaio, utilizando o programa *GOM Correlate*, para se obter os campos de deformação e deslocamento.

Finalmente, desenvolveu-se um modelo numérico utilizando o programa *Ansys19.2* para simular a falha na interface rocha-argamassa do ensaio realizado considerando o método de zona coesiva. Os resultados laboratoriais foram utilizados para calibrar o modelo numérico de forma que, ao apresentar resultados qualitativa e quantitativamente próximos do ensaio, o modelo numérico foi considerado calibrado e, foram estimados diversos parâmetros físicos da interface coesiva entre os materiais. Na Figura 2 é apresentado o fluxograma da metodologia da pesquisa.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia adotada neste trabalho

Fonte: O autor.

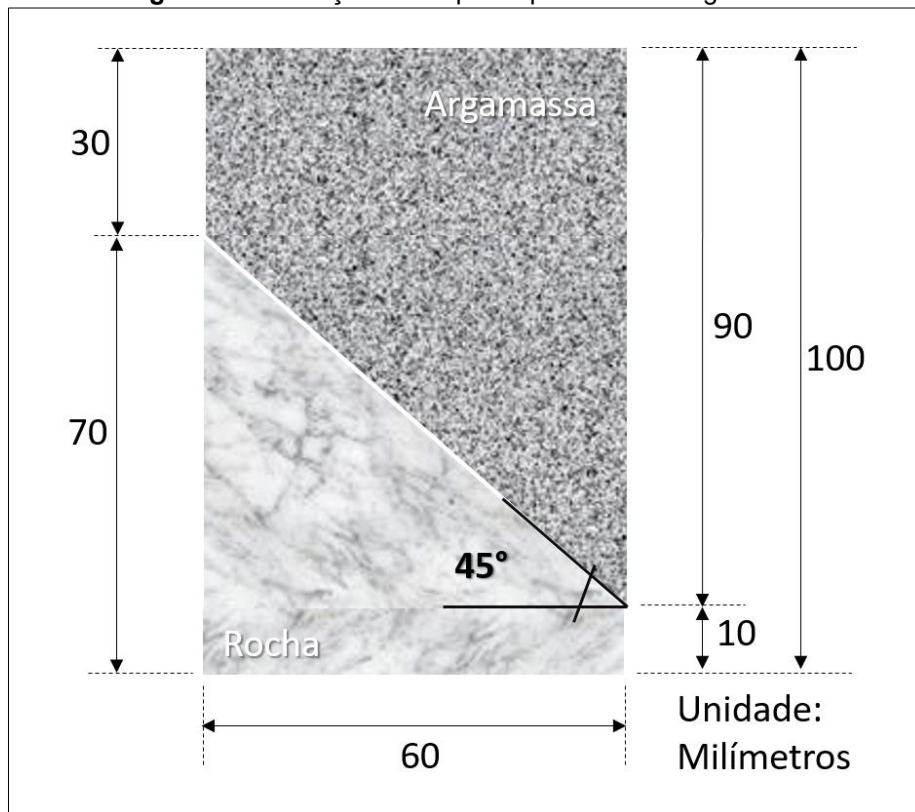
2.2. ETAPA 2

Nesta etapa estão concentradas as atividades relacionadas à montagem, execução e obtenção de dados relacionados ao ensaio experimental.

2.2.1. Preparação do Ensaio Experimental

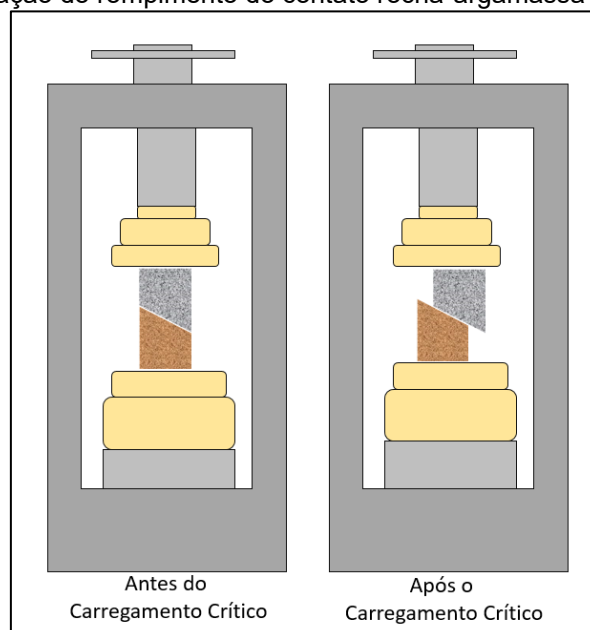
O ensaio experimental está limitado aos recursos disponíveis para a sua execução. Dessa forma, realizou-se o levantamento dos equipamentos disponíveis no laboratório de Engenharia Civil do Centro Universitário União das Américas, onde o discente de mestrado ministrava aulas de engenharia civil na graduação, para a realização do ensaio.

De acordo com a disponibilidade da infraestrutura do laboratório, foi possível desenvolver um ensaio de descolamento de interface rocha-argamassa submetida a tensões normais e cisalhantes por meio de uma prensa hidráulica de compressão axial simples. Na Figura 3 são apresentadas as dimensões do corpo de prova em milímetros, bem como os materiais de cada componente.

Figura 3 – Ilustração do corpo de prova rocha-argamassa

Fonte: O autor

O corpo de prova foi submetido a um carregamento axial controlado nas extremidades até ocorrer a ruptura do contato rocha-argamassa por cisalhamento, conforme é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Ilustração do rompimento do contato rocha-argamassa do corpo de prova

Fonte: O autor.

2.2.2. Mapeamento dos campos de Deformações por Meio do Método CID

Esta etapa abrange todos os procedimentos necessários para a realização da correlação das imagens digitais do ensaio.

Inicialmente, aplicou-se uma textura aleatória na superfície do corpo de prova, seguindo as boas práticas descritas no **capítulo 4.3**.

Posteriormente, realizou-se o ensaio em diversas etapas. Em cada etapa, o corpo de prova (CP) era submetido a um acréscimo de carregamento. Para cada acréscimo de carregamento, registrou-se a imagem do CP por meio de fotografias ou filmagem de vídeo, utilizando uma câmera de alta resolução posicionada normal ao plano de interesse.

No final do ensaio, após aplicar o carregamento que promoveu a ruptura total da interface de contato entre a rocha e a argamassa, as imagens foram submetidas ao processo de correlação para a obtenção dos campos de deformações e deslocamento temporal.

Após a realização de uma pesquisa sobre os principais algoritmos CID disponíveis de forma aberta e/ou gratuita, decidiu-se utilizar o programa *GOM Correlate*.

O programa *GOM Correlate* é a versão gratuita do programa *GOM Correlate Professional*. Possui diversos pacotes de processamento e pós-processamento de correlação de imagens e vídeos digitais. Os algoritmos de correção, permite o processamento de imagens sem o seu tratamento prévio (texturização). As imagens podem ser importadas a cores, sendo exigido somente a numeração das imagens no nome do arquivo.

2.3. ETAPA 3

Nesta etapa estão reunidos os procedimentos para elaboração e calibração do modelo numérico que simula o ensaio experimental.

2.3.1. Desenvolvimento de um modelo numérico para simular o ensaio

O modelo numérico foi desenvolvido utilizando o programa Ansys19.2. Por meio da ferramenta *Fracture* foi possível simular a ruptura da interface de contato entre os materiais utilizando ferramentas de descolamento de zonas coesivas.

2.3.2. Calibração do modelo utilizando os dados experimentais (CID)

Realizando uma análise paramétrica comparando os resultados CID do ensaio e os numéricos do modelo MEF, de forma qualitativa e quantitativa, foi possível alcançar valores aceitáveis de diferença entre o comportamento do ensaio experimental e do modelo numérico, de forma a considera-lo calibrado.

Finalmente, foi possível determinar vários parâmetros físicos, como por exemplo: Tensão máxima cisalhante, deslocamento máximo de ruptura e a taxa de liberação de energia de deformação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um dos primeiros trabalhos relacionados ao método de correlação de imagens digitais (CID) foi publicado em 1982 pelos autores Ranson e Peters. No trabalho foi proposta a abordagem matemática para converter imagens bidimensionais digitalizadas em um plano de um espécime que sofre deformações. Mas foi somente em 1985 que foram publicados os primeiros experimentos com o objetivo de validar os conceitos da metodologia CID-2D por CHU et al.

Aplicações mais refinadas foram realizadas por McNeill et al em 1987. O trabalho realizou estimativas do fator de intensidade de tensão da ponta de uma trinca.

Na época, os pesquisadores tinham um grande problema de tecnologia computacional. Em uma análise CID-2D, os autores mostraram que o tempo necessário para calcular o deslocamento digital de um conjunto de quadrado de 31 *pixels* era de aproximadamente 30 minutos utilizando um *mainframe* VAX 11-780. Considerando a resolução das imagens digitais da época, para se de calcular o deslocamento de todos os conjuntos de *pixels* não sobrepostos nas imagens, eram necessários quase seis dias.

Com o avanço tecnológico, o método CID foi ganhando espaço por ser uma excelente ferramenta para calibrar modelos numéricos por meio dos resultados de campos de deformações obtidos por meio do monitoramento de ensaios experimentais.

Em relação ao comportamento de contato entre concreto e rocha na engenharia civil, devido a sua importância na estabilidade de estruturas críticas, diversos estudos foram realizados para investigar a interação na interface entre esses materiais.

Em 1984, JOHNSTONE e LAM realizaram uma série de testes de cisalhamento em juntas de rocha e concreto não cimentado, submetidos a carregamentos normais e em condições de rigidez constantes. Os resultados experimentais indicaram que o comportamento de cisalhamento de juntas de concreto-rocha não cimentados depende principalmente da rugosidade da interface.

A evolução do processamento computacional permitiu o desenvolvimento de modelos numéricos capazes de simular o comportamento de cisalhamento de interfaces concreto-rocha de forma mais eficiente. Nesse sentido, KARAMI e STEAD em 2008, usaram um código híbrido de elementos finitos e discretos (*FEM/DEM*) do programa *ELFEN* para compreender o processo de degradação da superfície da junta durante testes de cisalhamento direto.

Bahaaddini et al. (2013), usaram o software *PFC2D* para acompanhar a

evolução do dano durante o processo de cisalhamento em fraturamento por tração e cisalhamento das asperezas das rochas.

No entanto, esses métodos dificilmente podem simular o comportamento do cisalhamento de juntas de concreto-rocha cimentadas considerando a resistência de união das interfaces coesivas. Dessa forma, TIAN et al. (2014), realizaram uma investigação experimental e numérica do comportamento de cisalhamento de juntas de concreto-rocha cimentadas por ensaios de cisalhamento direto. Nesse trabalho, focou-se na determinação da resistência ao deslizamento das juntas. Para isso, foi utilizado o calcário com superfície lisa para reduzir o efeito da rugosidade da amostra. Os resultados experimentais mostraram que a resistência ao cisalhamento de juntas com boa adesão está intimamente relacionada à resistência de união das interfaces coesivas quando a tensão normal aplicada é inferior a 6 MPa. Os ensaios permitiram também, analisar os processos repentinos e graduais de falha na interface coesa por meio da observação do aumento da tensão normal. Utilizando o programa *Abacus*, desenvolveu-se um modelo numérico para simular o ensaio realizado. O modelo, calibrado por meio do ensaio experimental, foi capaz de simular o comportamento elástico da ligação antes da tensão de cisalhamento de pico, e o comportamento não linear (pós-pico), devido a falha da ligação e o aumento da fricção da junta.

Considerando também, que a interface entre o concreto e a rocha é a zona mais fraca de um sistema de engenharia composta por esses dois elementos, HONG et al. (2014), investigaram a dependência do comportamento de fratura de interfaces concreto-rocha na taxa de mistura de modos de fratura (I, II e III) usando métodos experimentais e numéricos. As análises experimentais envolveram ensaios de cisalhamento de quatro pontos de vigas compostas de concreto e rocha. Este foi projetado para testar uma ampla gama de taxa de mistura de modos de fratura usando a teoria da mecânica da fratura elástica linear. A resistência e a energia da fratura são quantificadas primeiro em termos da taxa de mistura de modos. O método dos elementos finitos de limite escalonado, conhecido por sua precisão na modelagem de fraturas, foi utilizado para calcular a tenacidade e a energia da fratura. Posteriormente, o processo de propagação de trincas da viga composta de concreto e rocha foi modelado usando a teoria da mecânica de fratura não linear. O método dos elementos finitos de limite escalonado foi acoplado a elementos de interface para modelar a zona de processo de fraturamento, que é uma característica da fratura em materiais quase-frágeis, como é o caso da interface concreto-rocha. Utilizou-se uma formulação revisada do método de elementos finitos em várias escalas usando

coordenadas generalizadas para modelar as trações coesas. Considerou-se que a fratura coesa na interface ocorre quando os fatores de intensidade de tensão do Modo I ou do Modo II mudam de sinal. Dessa forma, utilizou-se um algoritmo de remalhamento para simular a propagação da fissura na interface. Finalmente, as simulações foram validadas por meio de medições realizadas com os ensaios experimentais.

Explorando a técnica de correlação de imagens digitais (CID), WEI et al. (2016), aplicaram a técnica CID para estudar o processo de propagação de fissuras na interface concreto-rocha em dois ensaios diferentes: flexão de três pontos e cisalhamento de quatro pontos. Os resultados obtidos permitiram analisar os campos de deslocamento, a largura da fissura e o comprimento da propagação durante o processo de fraturamento. A técnica de Correlação de imagens (CID) foi empregada para se analisar as propriedades das fraturas e caracterizar o comprimento da zona de processo da fraturamento (ZPF) no ensaio de flexão de três pontos. No caso do ensaio de cisalhamento de quatro pontos, obtiveram-se os deslocamentos de abertura em diversos estágios antes de se alcançar o carregamento crítico. Dessa forma, foram obtidas informações relacionadas à evolução da zona de processo de fraturamento (FPZ – Sigla em inglês) na interface concreto-rocha. Analisou-se que, quando submetido ao campo de deslocamentos do ensaio de flexão de três pontos, a fratura da interface concreto-rocha apresenta predominantemente o modo I. Porém, foram observados pequenos deslocamentos deslizantes. Observou-se também que, o comprimento da zona de processo da fraturamento durante a carga de pico é maior no ensaio de cisalhamento de quatro pontos do no ensaio de flexão de três pontos.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. MECÂNICA DA FRATURA ELÁSTICA LINEAR

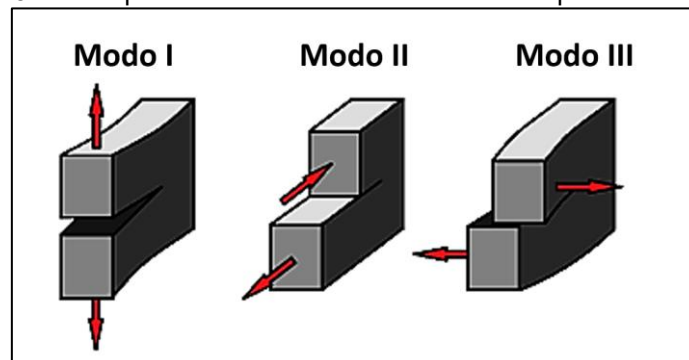
A mecânica da fratura foi desenvolvida após uma série de acidentes que ocorreram na engenharia em condições de tensões que, teoricamente estavam abaixo das tensões de ruptura dos materiais. Após muitos estudos, concluiu-se que os problemas eram decorrentes das concentrações de tensões nas imperfeições dos materiais (LÓPEZ et al., 2015).

A mecânica de fratura elástica linear (LEFM – Sigla em Inglês) define dois parâmetros que são utilizados para avaliar os critérios de falha em torno de uma trinca ou defeito pré-existente no material, sendo eles: o SIF (fator de intensidade de tensão – Sigla em inglês) e a SERR (taxa de liberação de energia de deformação – Sigla em inglês). Esses dois fatores são utilizados para analisar a propagação de trincas e o descolamento de superfícies em contato. A maior limitação do método é a necessidade de uma fissura ou defeito existente no material pelo qual ocorrerá a propagação.

4.1.1. FATOR DE INTENSIDADE DE TENSÃO

Em sólidos homogêneos, Irwin (1948 apud Krueger, 2004), realizou vários estudos de campos de tensões ao redor da frente de uma trinca produzindo várias equações de forma fechada que descrevem as tensões em um sólido. Ao definir um sistema de coordenadas polares a partir da frente da trinca, pesquisadores posteriores perceberam que os campos de tensões poderiam ser generalizados para variar considerando apenas um parâmetro, definido como o fator de intensidade de tensão (FIT), representado pela letra K. O fator K possui um índice para determinar o modo de carregamento e consequentemente, o modo de propagação da fissura, conforme a Figura 5.

Figura 5 – Principais modos de deslocamentos de superfícies de trincas.



Fonte: Adaptado Krueger (2004).

MODO I

A fissura se propaga no plano por abertura normal à face da fissura.

Este modo está presente na maior parte dos casos e, conseqüentemente, é apresentado na maioria dos métodos analíticos e experimentais quando comparado com os outros modos.

MODO II

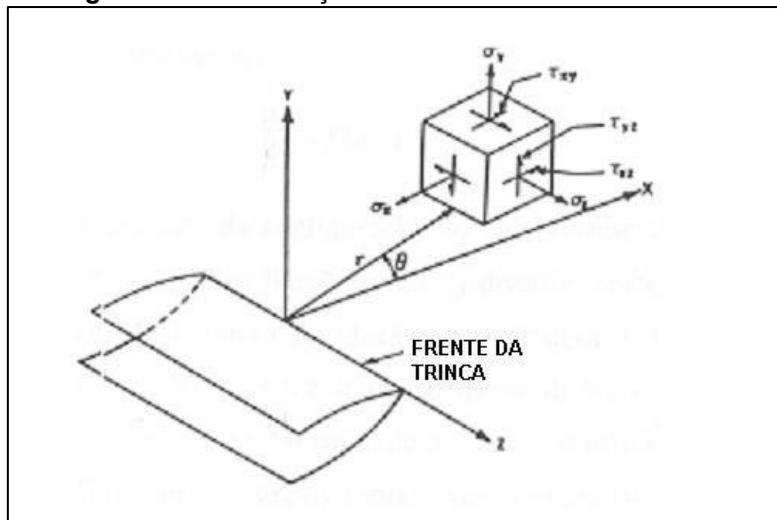
Este modo é caracterizado pela propagação no plano da fissura provocado pelo escorregamento entre as faces na direção do comprimento da fissura.

MODO III

A fissura se propaga devido ao escorregamento entre as faces do plano da trinca na direção normal ao comprimento da fissura.

As tensões presentes na frente de uma fissura (Figura 6) podem ser estimadas de acordo com as equações apresentadas na Eq.(1), considerando o MODO I de fratura.

Figura 6 – Concentração de tensões na frente da fratura



Fonte: Adaptado de Krueger (2004).

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

Já para o MODO II de fratura, o campo de tensões na frente da trinca pode ser estimado pelas equações apresentadas na Eq.(2).

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left([1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}] \right)\end{aligned}\tag{2}$$

Assim, o campo de tensões para uma análise 2D é definido pelos fatores K_I e K_{II} . Caso a propagação da fissura seja consequência de ambos os modos, I e II, deve-se realizar a superposição para se obter a condição de carregamento para o modo misto de fissuras.

O fator K pode ser calculado analiticamente em função do campo de tensões e do comprimento da trinca considerando configurações de carregamentos conhecidos. Quando submetidos ao modo I, os materiais homogêneos tendem a apresentar um modo I puro de falha. Dessa forma, o valor crítico que causa a trinca é conhecido como o fator de intensidade de tensão crítica K_{IC} . Esse fator, é uma propriedade do material que pode ser medida por meio de experimentos que promovem a propagação de uma fissura. Assim, se o fator K excede K_{IC} em qualquer fissura de um sólido homogêneo, a fissura irá se propagar (Irwin 1948, apud Krueger, 2004).

4.1.2. TAXA DE LIBERAÇÃO DE ENERGIA DE DEFORMAÇÃO

Considerando a mecânica da fratura em função da energia, a taxa de liberação de energia de deformação (TLED) é utilizada para analisar o crescimento da trinca. Para aumentar a fissura, é necessário acrescentar energia para criar duas novas superfícies dentro do material. A taxa de variação de energia em relação à área da fissura é definida como G . Assim, G é a energia disponível do carregamento aplicado para propagação da fissura.

A taxa de liberação de energia foi definida como uma forma modificada do balanço de energia de Griffith, onde Π é a energia potencial armazenada em um material elástico e A é a área da trinca, conforme a Eq.(3) (ANDERSON, 2005).

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (3)$$

No caso da mecânica da fratura elástica linear, a relação entre K e G pode ser validada por meio da análise de Irwin. Dessa forma, G pode ser expresso conforme a Eq.(4).

$$G = \frac{K^2}{E} \text{ (Tensões planas)} \quad (4)$$

$$G = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) \text{ (Deformações planas)}$$

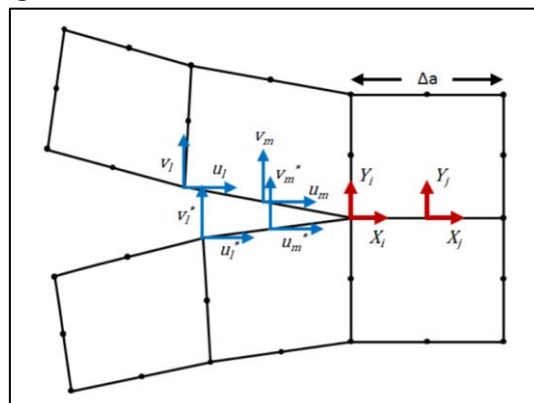
Similar à análise do fator de intensidade de tensão, a fissura só irá se propagar se G alcançar um valor crítico, conhecido como taxa crítica de liberação de energia de deformação G_C .

4.1.3. Técnica de Fechamento de Fissura Virtual (TFFV)

Em muitos casos, as equações de formas fechadas da taxa de liberação de energia de deformação são funcionais para geometrias conhecidas. Mas nas situações onde as equações são difíceis de se derivar analiticamente, as soluções numéricas são aplicadas. Muitas técnicas para a mediação da TLED foram implementadas em programas baseados no método dos elementos finitos (MEF), incluindo a fissura virtual, fechamento de fissura virtual e Integral J.

A técnica de fechamento de fissura foi desenvolvida por Krueger em 2004. Para aplicá-la, deve-se modelar a frente da trinca no modelo MEF. A teoria TFFV não necessita de uma singularidade de frente de trinca para capturar o seu comportamento. No caso 2D, uma frente de trinca é construída no modelo por nós desacoplados ao longo do comprimento da trinca. Uma ilustração do método é apresentada na **Figura 7**.

Figura 7 – Malha de uma fissura baseada TFFV



Fonte: Adaptado de Krueger (2004).

A técnica de fechamento de fissura virtual assume que a trinca se estende de um comprimento a para um comprimento $a + \Delta a$, de forma que a frente da trinca permaneça inalterada. Ou seja, assume-se que a força e o deslocamento de abertura da frente da trinca é idêntica para cada Δa . Assim, a energia liberada para estender a fissura é equivalente a energia necessária para fechar a trinca ao longo do comprimento Δa . As equações utilizadas para calcular o fator G considerando um elemento retangular de oito nós são apresentadas na Eq.

(5).

$$\begin{aligned} G_I &= \frac{1}{2\Delta a} [Y_i(v_i - v_i^*) + Y_j(v_m - v_m^*)] \\ G_{II} &= -\frac{1}{2\Delta a} [X_i(u_i - u_i^*) + X_j(u_m - u_m^*)] \end{aligned} \quad (5)$$

Sendo v e u deslocamentos vertical e horizontal, respectivamente. Y e X são forças nodais vertical e horizontal na frente da trinca. Para se obter Y e X , somam-se forças somente na superfície superior da trinca.

4.1.4. Técnica Integral J

A Integral J, desenvolvida por Rice e Sih em 1968, é outra técnica implementada em programas MEF, utilizada para calcular a energia de deformação liberada (TRAN, 2013). Para o caso 2-D, J pode ser simplificado como uma integral de linha independente ao redor da frente da fissura, conforme a Eq.(6).

$$J = \int_{\Gamma} \left(w dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (6)$$

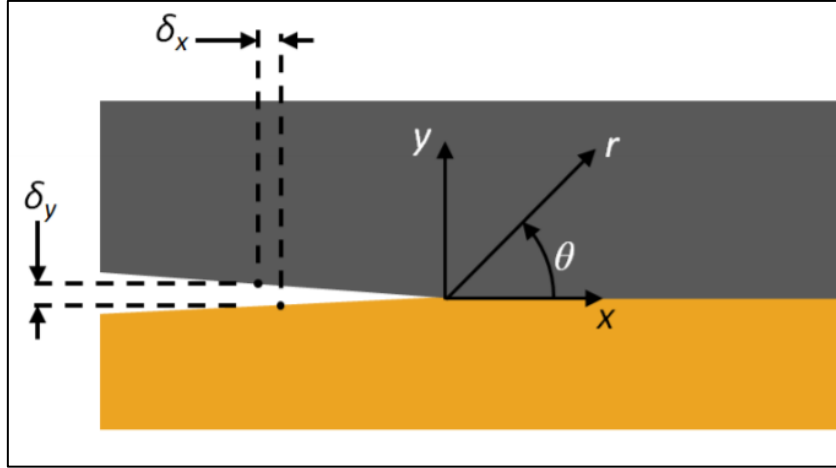
Sendo J o caminho independente não linear da taxa de energia de deformação liberada ao longo do contorno Γ , w é a densidade de energia de deformação, T_i é uma componente do vetor de tração, u_i é uma componente do vetor de deslocamento.

Assim, a integral J considera efeitos não lineares que podem ser utilizados para analisar a fissura como um material elasto-plástico. Para o caso elástico, J é igual a G (Rice and Sih, 1968).

4.1.5. MECÂNICA DA FRATURA INTERFACIAL

Quando se considera a propagação de uma fissura em um sólido formado por dois materiais, conectados por uma superfície, é necessário adicionar mudanças nas equações para descrever o comportamento dessa fissura. Esse tipo de fissura é chamado de problema de fratura bimaterial. Na Figura 8 é apresentada uma imagem ilustrativa de uma fissura na superfície de contato entre dois materiais (Agrawal and Karlsson, 2006).

Figura 8 – Fissura na superfície de contato entre dois materiais diferentes



Fonte: Adaptado de Krieger (2014).

Esse tipo de problema foi resolvido pela primeira vez, analiticamente, por Williams em 1959. Ele determinou a tensão ao redor de uma singularidade em uma frente de trinca aguda em uma fissura interfacial bimaterial, descrita pela constante ε apresentada na Eq.(7).

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1 - \beta}{1 + \beta} \right)$$

$$\beta = \frac{\mu_1(\zeta_2 - 1) - \mu_2(\zeta_1 - 1)}{\mu_1(\zeta_2 + 1) + \mu_2(\zeta_1 + 1)} \quad (7)$$

Sendo ε a constante bimaterial e β , um dos parâmetros de Dunder, μ é o módulo de cisalhamento definido por $\mu = \frac{E_i}{2(1+\nu_i)}$, e ζ é igual a $\zeta_i = (3 - 4\nu_i)$ para o estado plano de deformação. Uma boa magnitude de ε indica baixa similaridade dos materiais. Dessa forma, em materiais homogêneos, $\varepsilon = \beta = 0$.

Devido às diferenças entre os materiais, a fissura da interface experimenta uma condição mista de modos de fratura, mesmo quando é submetida somente ao modo I

de carregamento (Agrawal and Karlsson, 2006).

A solução do campo do fator de intensidade de tensão (K) para uma interface bimaterial é apresentada na Eq.(8).

$$\sigma_y + i\sigma_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} (K_I^* + iK_{II}^*) r^{i\varepsilon} \quad (8)$$

Sendo $K = K_I^* + iK_{II}^*$, o fator complexo de intensidade de tensão que representa o modo de abertura e o de cisalhamento, exclusivamente para problemas bimateriais. Assim, diferente da fratura homogênea, a fratura interfacial é extremamente dependente do modo misto (Agrawal and Karlsson, 2006).

4.1.6. MODO MISTO PARA FRATURAS INTERFACIAIS

Foram realizados diversos estudos para investigar métodos analíticos e numéricos para avaliar o Modo misto em interfaces bimateriais. O modo misto interfacial é definido como uma relação proporcional de cisalhamento e tração normal na frente da ponta da trinca (Agrawal e Karlsson, 2006).

Os métodos analíticos propostos para calcular o modo misto se mostraram matematicamente complexos (Hutchinson e Suo, 1992). Dessa forma, os métodos numéricos passaram a ser a melhor opção para modelar esse tipo de problema. Alguns métodos utilizados são: método do deslocamento da superfície da fissura, método da Integral M e a técnica de fechamento de fissura virtual modificada (MATOS et al, 1989).

4.2. MODELO DE ZONA COESIVA

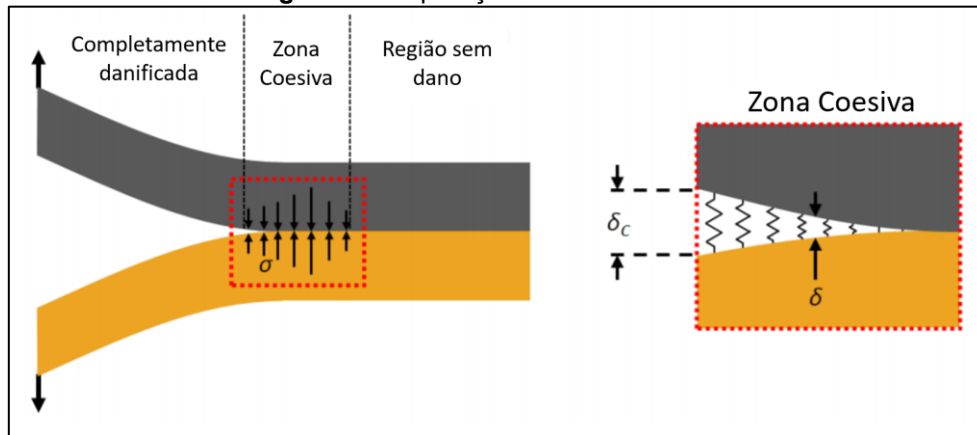
De acordo com Krieger (2014), o modelo da zona coesiva (MZC) é uma tecnologia emergente capaz de simular o início da formação de uma fissura e a sua propagação. Assim, a maior vantagem da teoria da zona coesiva é que não é necessário saber onde a trinca está ou iniciará. Os modelos de zona coesiva têm sido utilizados para simular diversos tipos de interfaces.

4.2.1. FRATURAMENTO DE ZONA COESIVA

Nos MZC, a separação interfacial ocorre dentro de uma zona de dano coesivo, ou seja, quando o dano excede um limite pré-estabelecido. Dentro de uma zona coesiva

(ZC), há tensões de tração ativas entre as superfícies. A interação é governada pela lei de separação de tração. Antes de se aplicar o carregamento, um elemento de ZC é declarado como íntegro (sem dano). Já um elemento completamente danificado, foi completamente separado e não produz nenhuma força de interação entre as superfícies coesivas, ou seja, alcançou o valor de danificação igual a um. Na Figura 9 é apresentada uma ilustração da separação interfacial de um MZC (Krieger, 2014).

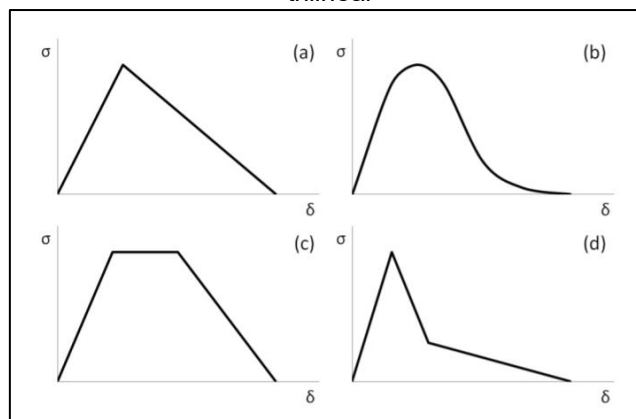
Figura 9 – Separação interfacial de MZC



Fonte: Adaptado de Krieger (2014).

A tensão de tração σ é exercida pela interface até que a separação interfacial δ alcance o valor crítico δ_c . σ é uma função de δ por meio da lei de separação de tração. Conforme um elemento começa a se danificar, a área abaixo da função da lei de separação de tração contabiliza o trabalho mecânico necessário para separar o elemento. Assim, a área abaixo da curva é equivalente ao G_c . Várias leis de ZC são utilizadas para descrever o comportamento dos materiais. Na Figura 10 são apresentadas as leis mais utilizadas: Bilinear, exponencial, trapezoidal e trilinear (Krieger, 2014).

Figura 10 – Leis de separação por tração para MZC: (a) Bilinear, (b) exponencial, (c) trapezoidal e (d) trilinear



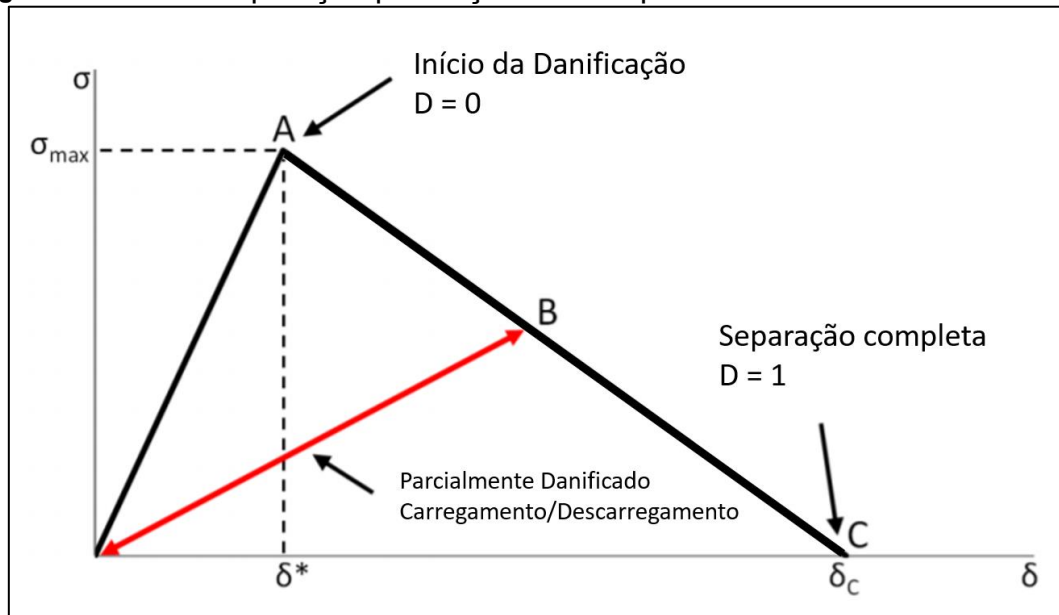
Fonte: Adaptado de Krieger (2014).

A definição dessas leis não é trivial, uma vez que, não é possível medir os parâmetros de uma zona coesiva de forma experimental. Essas leis de separação por tração, apresentadas na Figura 10, com exceção da lei bilinear, precisam de quatro ou mais parâmetros para definir completamente o comportamento da ZC.

4.2.2. LEI BILINEAR DE SEPARAÇÃO POR TRAÇÃO

A lei de separação por tração bilinear foi apresentada por Alfano e Crisfield em 2001, para modelar a separação interfacial. Diversas interfaces bimateriais foram simuladas utilizando esta lei. Na Figura 11 é apresentada a lei bilinear.

Figura 11 – Lei de separação por tração bilinear para elementos de zona coesiva



Fonte: Adaptado de Krieger (2014).

A lei bilinear é modelada pela tração σ em função da separação interfacial δ . Como os elementos de ZC sofrem deformações, eles apresentam um comportamento linear para $\delta < \delta^*$. Nessa região da curva, nenhum dano é acumulado na interface e, conseqüentemente, o descarregamento resulta no retorno da ZC até a sua configuração original. Já no ponto A, a tensão de tração crítica é alcançada (σ_{max}), e o processo de danificação é iniciado. O descolamento é monitorado em função do parâmetro de dano D , calculado pela Eq.(9). Quando $\delta > \delta^*$, D aumenta e, quando $\delta \geq \delta_c$, D é máximo, ou seja, igual a 1.

$$D = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{se } \delta \leq \delta^* \\ \left(\frac{\delta - \delta^*}{\delta_c - \delta^*} \right) & \text{se } \delta^* < \delta < \delta_c \\ 1 & \text{se } \delta \geq \delta_c \end{array} \right\} \quad (9)$$

Independentemente do valor de δ , o valor do dano D nunca pode diminuir. Dessa forma, o descarregamento não diminui o dano que já foi acumulado. Assim, os elementos da ZC que são descarregados enquanto ainda estão parcialmente danificados (ponto B do gráfico da Figura 11), retornarão apresentando uma rigidez reduzida. Quando o carregamento é retomado, os elementos retomarão o mesmo caminho de rigidez reduzida até alcançar o ponto B novamente. A partir desse ponto, o processo de danificação será iniciado novamente (KRIEGER, 2014).

Quando o parâmetro de dano D alcança o valor unitário, o elemento da ZC está completamente danificado e a sua rigidez da zona coesiva é zero. Nesse caso, o elemento danificado se separou do contato e não produz nenhuma interação com a superfície. Ao longo da separação, a tensão de tração é uma função da separação interfacial, apresentada na Eq.(10).

$$\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\delta^*} (1 - D) \delta \quad (10)$$

Sabendo que a área abaixo da curva tração-separação da lei bilinear é a taxa de liberação de energia de deformação, pode-se assumir que, para a lei bilinear $G_c = \frac{1}{2} \delta_c \sigma_{max}$.

4.2.3. IMPLEMENTAÇÃO DO MODO MISTO DE FRATURA DA LEI BILINEAR

De acordo com Krieger (2014), do ponto de vista aplicável, as fissuras sempre se propagam sob condições de Modos mistos de fraturamento. Dessa forma, duas leis bilinear são necessárias para definir o modo misto do comportamento de uma ZC. Assim, a lei bilinear corresponde ao modo I puro e o modo II puro para o descolamento, onde o modo misto será aplicado pelo programa MEF por meio de interpolações. Cada lei bilinear é definida por três parâmetros: Tensão máxima de tração σ_{max} , deslocamento crítico δ_c e a taxa de carregamento e descarregamento $\alpha = \frac{\delta^*}{\delta_c}$.

4.3. CID – Correlação de Imagens Digitais

A quantificação da deformação de um objeto submetido a um carregamento possibilita a determinação de várias propriedades físicas, como por exemplo, o carregamento máximo suportado pelo material no regime elástico, bem como o seu comportamento não linear após atingir esse limite (frágil ou dúctil). As deformações permitem também a determinação da distribuição de tensões, por meio da relação entre a Tensão e a deformação (SILVA, 2019).

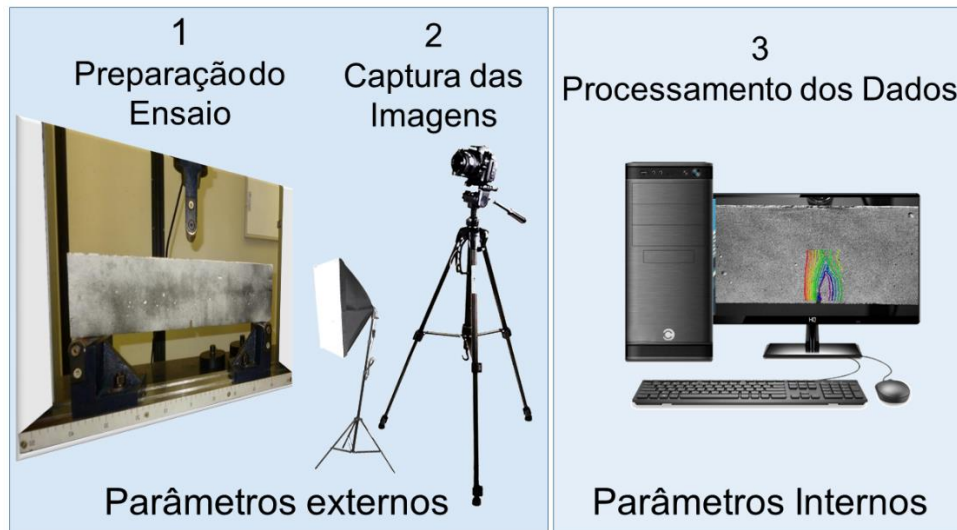
As deformações podem ser obtidas por meio da instalação de instrumentos de medição, como por exemplo o extensômetro. Porém, a instalação e a calibração desses instrumentos podem se tornar um processo moroso e caro, uma vez que, em se tratando de materiais frágeis de alta resistência, a ruptura abrupta do material, ao atingir o limite de resistência, pode danificar o instrumento.

Outro aspecto em relação à instrumentação de ensaios está relacionado à localidade da instalação e a direção que se é medida. Normalmente, esses instrumentos medem a deformação de um ponto do ensaio e na direção em que o extensômetro é instalado. Dessa forma, em estudos de materiais anisotrópicos, onde os materiais apresentam diferentes propriedades físicas em relação à direção, essa metodologia de ensaio é muito limitada. Em contrapartida, a Correlação de Imagens Digitais (CID) se apresenta como uma poderosa ferramenta para se realizar análises globais de ensaios de deformação em superfícies de forma precisa e acessível (SILVA, 2019).

O método CID é baseado na análise de sucessivas imagens, que são obtidas antes e após a deformação de um objeto submetido a um carregamento. Essas imagens são analisadas por um algoritmo de correlação que, inicialmente divide a imagem de referência (sem deformações) em várias seções, também conhecidas como blocos. Essas seções são mapeadas e buscadas pelo algoritmo na imagem seguinte, após a deformação. Cada bloco é formado por um conjunto único de pixels e o objetivo do algoritmo é determinar a sua nova posição após o carregamento. Para que cada seção seja única, a superfície do objeto deve apresentar uma textura aleatória de alto contraste em toda a área de interesse. Essa textura pode ser natural ou artificial, criada através da pintura aleatória utilizando diversas formas e escalas de cinza (SUTTON et. al, 2009).

De acordo com Beleza (2017), a metodologia CID possui duas fontes de parâmetros que devem ser ajustados e calibrados, distribuídos em três etapas de execução, conforme é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Ilustração das etapas CID e os parâmetros que envolvem cada uma delas



Fonte: Autor.

4.3.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Basicamente, a superfície de interesse do objeto analisado deve apresentar uma textura que possibilita a visualização da deformação do material pelo algoritmo CID. Essa superfície deve apresentar uma distribuição aleatória de grãos, alto contraste e abranger de forma equilibrada todos os tons de cinza, desde o nível 0 (preto) até o nível 255 (branco) (SILVA, 2019).

Textura da superfície

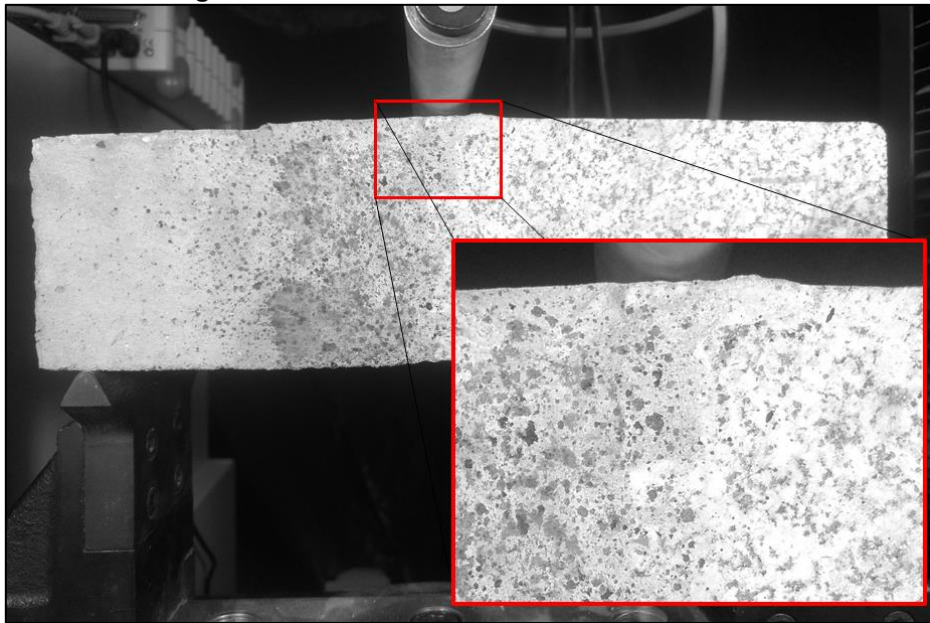
A textura deve apresentar um padrão estocástico, ou seja, aleatório de distribuição de grãos na superfície. Isso garante a correta correlação entre as imagens durante o processamento computacional. Em relação ao tamanho dos grãos, este dependerá do tamanho da área de interesse do corpo de prova e da resolução da câmera fotográfica digital disponível. As escalas de cinza podem ser equilibradas utilizando todas as cores durante a criação da textura e, convertendo a imagem para uma escala monocromática posteriormente. A aleatoriedade da textura pode ser obtida através da aplicação de tinta utilizando um borrifador. Já o contraste adequado, pode ser obtido realizando duas etapas de pintura (SUTTON et. al, 2009):

- Primeira: aplicação de uma camada de tinta branca na superfície.

- Segunda: aplicação de tintas coloridas utilizando um equipamento que gere uma distribuição aleatória de grãos, como por exemplo, um borrifador.

Na Figura 13 é apresentada a textura da superfície de um corpo prova no qual foram realizados estudos de correlação de imagens digitais para obtenção de deformações e deslocamentos.

Figura 13 – Detalhes da textura de um ensaio CID



Fonte: Adaptado das Imagens dos trabalhos do Prof. Dr. Ricardo A. Picón Rodríguez

Luminosidade do Ambiente

Recomenda-se a utilização de fontes artificiais de iluminação para garantir a mesma intensidade de luz durante todo o período que o ensaio for realizado. Uma vez que os dados do ensaio são obtidos através da captura de imagens, o processamento CID é extremamente sensível à variação de luminosidade do ambiente. Além disso, a iluminação artificial auxilia no contraste da textura melhorando a precisão dos resultados (JUNIOR, 2008).

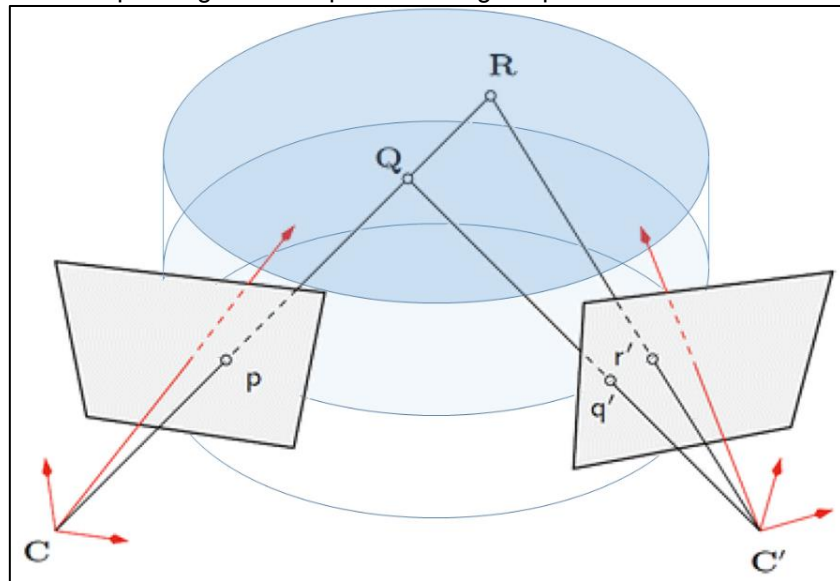
Captura das imagens

A captura da imagem do ensaio é realizada utilizando uma câmera fotográfica digital que pode ser de média a alta resolução, dependendo do tipo do tamanho da área de interesse e do programa que será utilizado para o processamento dos dados.

No caso de ensaios CID-2D, utiliza-se uma única Câmera que deve ser instalada de modo que o eixo fixo de visão seja perpendicular à superfície da amostra. A distância entre a câmera e o ensaio dependerá da resolução da máquina e da distância focal da lente utilizada. Essas imagens estão limitadas aos fenômenos físicos presentes no plano. Qualquer movimentação fora deste gera mudanças nas deformações da superfície acarretando em erros nos resultados. No CID-2D esse tipo de erro é conhecido como erro de perspectiva da câmera (SUTTON et. al, 2009).

Nos casos de ensaios CID-3D, o plano de interesse apresenta uma geometria tridimensional. Nesse caso, são necessárias no mínimo duas câmeras fotográficas, cujas distâncias e ângulos devem ser ajustados de acordo com os parâmetros de cada programa CID. Na Figura 14 é apresentada uma ilustração de um ensaio CID-3D (SUTTON et. al, 2009).

Figura 14 – Esquema geral da captura de imagens para ensaios CID Tridimensional



Fonte: Adaptado de Sutton et. Al (2009)

Resolução da câmera fotográfica

De acordo com Silva (2019), a resolução de uma câmera está relacionada com a quantidade de pixels por unidade de área da imagem. Quanto maior for a resolução, mais pixels há. Essa configuração é medida, normalmente, em pixels por polegada, cuja abreviação é *ppi*.

Distorções das lentes da câmera fotográfica

As distorções nas imagens induzidas pela lente de uma câmera digital acarretam em erros de medições que devem ser considerados durante a aplicação do método CID. A principal distorção apresentada pelas lentes são as distorções radiais, que podem ser descritas como deformações geométricas de uma imagem que ocorrem desde o centro até as extremidades (BELEZA, 2017).

Frequência de aquisição das imagens

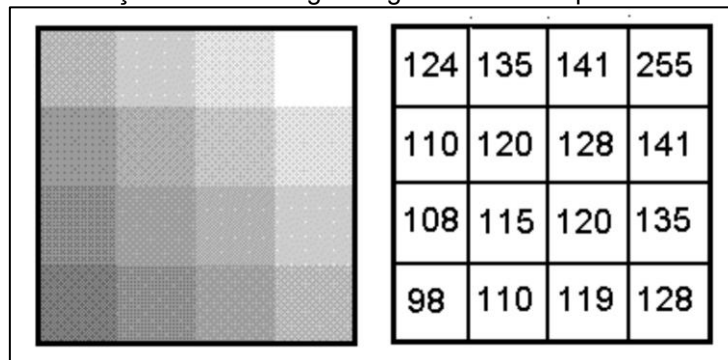
Esta variável está diretamente associada com o tempo de aplicação do carregamento e as deformações apresentadas pelo objeto em análise. Deve-se ponderar a frequência de captura de imagens para que os intervalos sejam suficientes para se mapear o comportamento físico, porém, é desejável não ter uma quantidade excessiva de imagens que apenas aumentarão o tempo de processamento sem agregar informações relevantes aos fenômenos físicos monitorados (SILVA, 2019).

4.3.2. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para se compreender as etapas de processamento de um algoritmo de correlação de imagens digitais é importante conhecer as limitações da variável de entrada, a imagem digital.

Imagem Digital

De acordo com Silva (2019), uma imagem digital pode ser definida com uma função bidimensional discreta $f(x, y)$, onde x e y são coordenadas no plano e a amplitude f é a intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. Cada ponto finito dessa equação é chamado de pixel. Na Figura 15 é apresentada uma ilustração de uma imagem em escala de cinzas e a sua respectiva matriz de pixels.

Figura 15 – Ilustração de uma imagem digital e a sua respectiva matriz de pixels

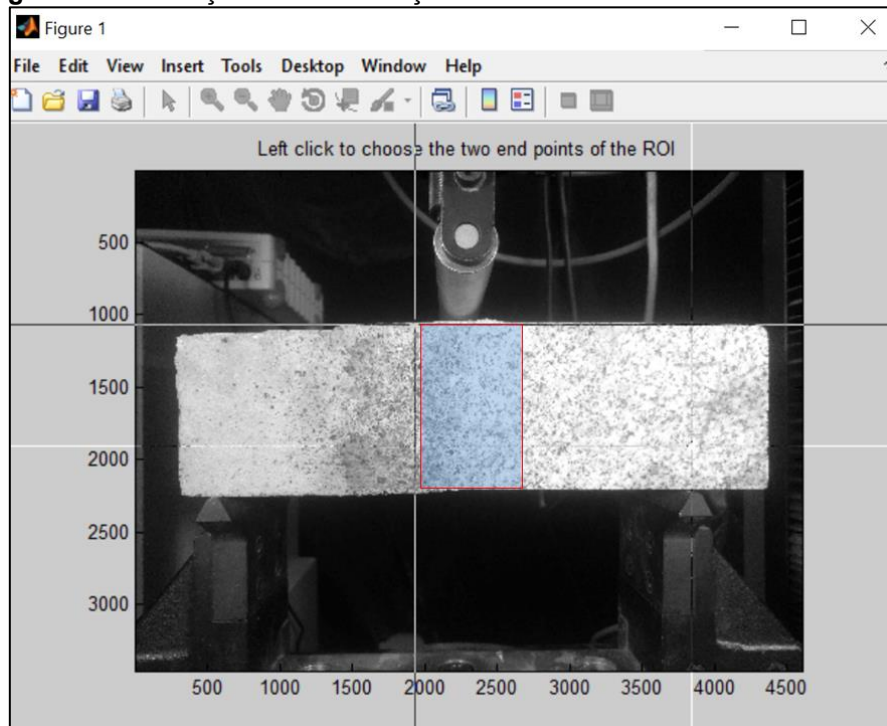
Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Do ponto de vista computacional, as imagens monocromáticas apresentam vantagens no processamento quando comparadas com as imagens coloridas. Isso ocorre porque a intensidade de cada pixel é definida com base em uma escala. Em uma imagem monocromática a escala de cinza varia do nível 0 (preto) até 255 (branco). Dessa forma, uma única matriz é capaz de armazenar essa informação. Porém, quando se trata de uma imagem colorida no formato RGB (*Red-Green-Blue*) por exemplo, são necessárias três matrizes para se definir a intensidade de cada pixel (vermelho, verde e azul). Por esta razão, muitos programas preveem somente a utilização de imagens monocromáticas (Silva, 2019).

Determinação da Área de Interesse

De acordo com SUTTON et. al (2009), os registros fotográficos de um ensaio abrangem não somente o objeto que está sendo ensaiado, mas também o ambiente ao redor. Em relação ao objeto, muitas vezes o que se deseja é obter informações de uma parte desse objeto e não de toda a superfície que está sendo fotografada. Dessa forma, durante o processamento das imagens, é importante se determinar a área de interesse da imagem de referência (sem deformações), ou seja, a área da imagem na qual o algoritmo realizará todas as análises CID. Em relação a esse parâmetro, o mais importante é delimitar a área levando em consideração a disposição deformada do ensaio. Se parte do corpo de prova se desloca para fora da área de interesse durante as análises das imagens, não será possível realizar a correlação dessas imagens. Na Figura 16 é apresentada uma imagem de referência de um ensaio experimental e a determinação da área de interesse utilizando o programa *Correli-Q4*.

Figura 16 – Ilustração da determinação da área de interesse de um ensaio CID

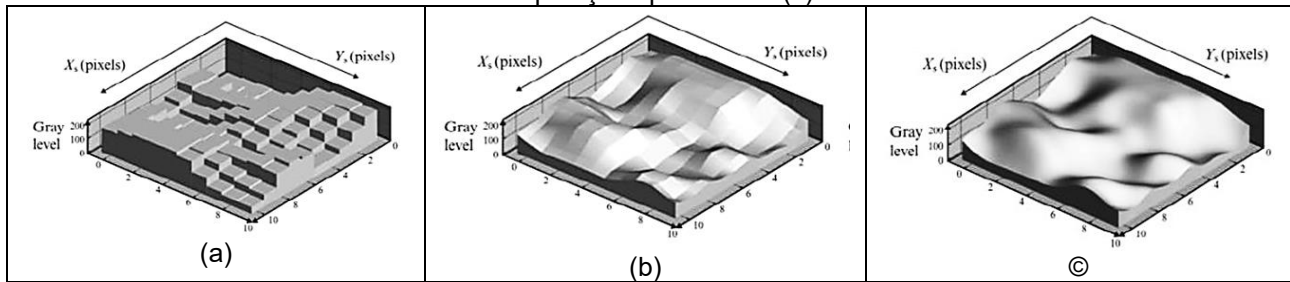


Fonte: Adaptado das Imagens dos trabalhos do Prof. Dr. Ricardo A. Picón Rodríguez

Função Interpoladora

Segundo Bornet (2008), a função interpoladora é responsável pelo aumento da precisão dos deslocamentos para valores menores que o tamanho do pixel da imagem. Isso é feito por meio da interpolação dos valores de intensidade entre pixels adjacentes. O método CID estima o deslocamento de um objeto através da correlação de conjuntos de pixels (blocos) entre as imagens, criando uma limitação de resolução espacial. Uma vez que o algoritmo detecta o movimento de um pixel como um número inteiro, a representação discreta das intensidades destes por meio de blocos não é a mais adequada para se obter o grau de precisão que o método exige. Dessa forma, a adição de valores interpolados entre os pixels se apresenta como uma solução para essa limitação. Na Figura 17 é apresentada a representação discreta das intensidades de pixels de um bloco (a), a representação desse mesmo bloco após a realização de uma interpolação bilinear (b) e, após a interpolação *spline cubic* (c). A interpolação das intensidades de pixel é uma das bases dos algoritmos do sub-pixel que permitem a obtenção de resoluções inferiores ao valor unitário de referência (tamanho do pixel), aumentando a precisão do cálculo de movimento dos blocos.

Figura 17 – representação discreta das intensidades de pixels de um bloco (a), a representação desse mesmo bloco após a realização de uma interpolação bilinear (b) e, após a interpolação spline cúbic (c)



Fonte: Adaptado de BORNERT (2008).

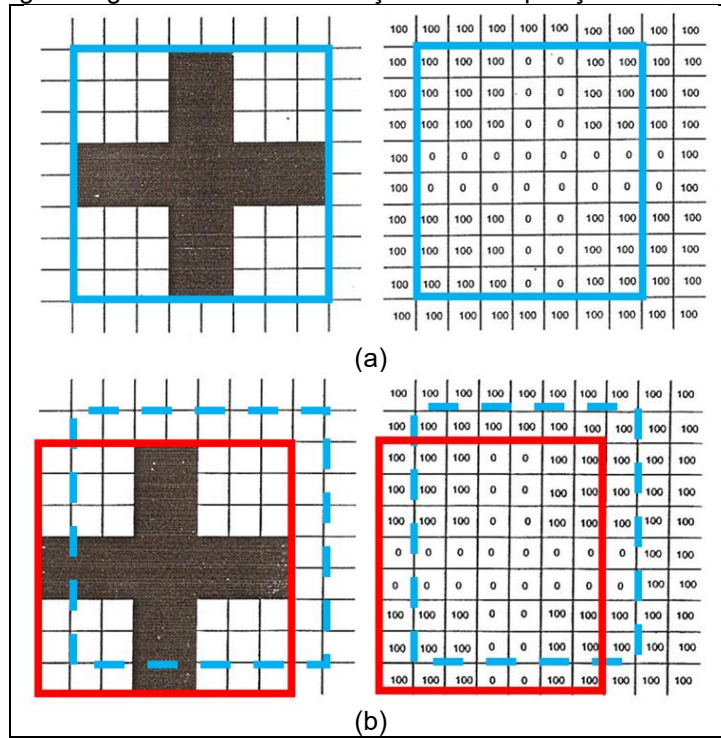
Correlação de conjuntos de pixels das imagens Digitais

Tendo a área de interesse delimitada na imagem de referência e uma superfície de ensaio com uma textura adequada, é possível compreender como os algoritmos CID realizam a correlação entre as imagens através da correspondência dos conjuntos de pixels, chamados de blocos (Silva, 2019).

Inicialmente, a imagem da área de interesse é dividida em várias pequenas partes que possuem uma quantidade significativa de pixels. Cada parte é chamada de bloco. Devido a aleatoriedade da textura, cada bloco apresenta uma matriz única de intensidade de pixels. Então, para cada bloco da imagem de referência, o algoritmo realiza uma varredura nos blocos da imagem subsequente até encontrar a matriz que mais se assemelha à primeira, por meio de uma função de minimização. Caso a textura não apresente um padrão estocástico adequado, mais de um bloco pode apresentar a mesma matriz de intensidade de tons, causando uma correspondência incorreta ou até mesmo a não correlação entre as imagens. Dessa forma, é possível notar a importância da aleatoriedade e a distribuição equilibrada de tons que a textura da superfície do objeto ensaiado deve apresentar (SILVA, 2019).

Na Figura 18 é apresentada uma ilustração de correspondência de blocos entre a imagem de referência (Figura 18 – a) e a próxima imagem correlacionada (Figura 18 – b).

Figura 18 – Imagem de referência com textura e sua respectiva matriz de intensidade de pixels (a) e a imagem seguinte com a identificação da nova posição do bloco (b)



Fonte: JUNIOR (2008).

As principais funções de minimização utilizadas nos algoritmos CID para realizar a correspondência de blocos entre as imagens são:

- NCC – *Normalized Cross Correlaton*, apresentada na Eq. (11).

$$C = 1 - \frac{\sum f(x,y)g(x',y')}{\sqrt{\sum f(x,y)^2 \sum g(x',y')^2}} \quad (11)$$

- SSD – *Sum of Squared Differences*, apresentada na Eq. (12).

$$C = \sum [f(x,y)^2 - g(x',y')^2] \quad (12)$$

- NSSD – *Normalized Sum of Squared Differences*, apresentada na Eq. (13).

$$C = \sum \left(\frac{\sum \sum f(x,y)g(x',y')}{\sum g(x',y')^2} g(x',y') - f(x,y) \right)^2 \quad (13)$$

Onde $f(x,y)$ e $g(x',y')$ representam as intensidades de pixels dos blocos (*subsets*) da imagem de referência e da seguinte, consecutivamente.

A correspondência é determinada quando as correlações entre os blocos de diferentes imagens minimizam uma dessas equações. Uma vez que a correlação é estabelecida, é possível calcular o deslocamento que o bloco teve de uma imagem para outra, possibilitando a determinação de campos de deslocamentos e deformações do material através da derivação dos deslocamentos dos blocos, utilizando as Equações apresentadas na Eq.(14) (BELEZA, 2017).

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{du}{dx} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{dv}{dy} \\ \gamma_{xy} &= \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx}\end{aligned}\tag{14}$$

Sendo ε a deformação, $\frac{du}{dx}$ e $\frac{dv}{dy}$ são as derivadas do deslocamento horizontal e vertical do centro do bloco de uma imagem para a outra, respectivamente.

Correlação de Blocos (Conjunto de Pixels) Considerando Distorções

De acordo com Sutton et. al (2009), durante o carregamento, a superfície analisada do material ensaiado pode sofrer não somente translações, mas também, distorções como achatamentos, alongamentos e até mesmo rotações. Se somente as translações forem consideradas, ao sofrer deformações, o algoritmo não é capaz de correlacionar um bloco com os blocos distorcidos da imagem seguinte, uma vez que, ocorrem mudanças significativas na matriz de intensidade de pixels que define a exclusividade de cada bloco. Para vencer essa limitação, os algoritmos CID possuem métodos matemáticos como por exemplo: transformações de Fourier, métodos diferenciais, Método de *Newton-Raphson*, método dos gradientes, entre outros. Dessa forma, os algoritmos CID são capazes de identificar a correspondência entre os blocos de uma imagem para outra considerando distorções que podem ser originadas dos mais diversos tipos de solicitações, como tração, compressão, cisalhamento e flexão.

Cada rotina apresenta uma precisão e esforço computacional. Dessa forma, a escolha do método matemático utilizado é do usuário, de acordo com a suas necessidades e poder computacional disponível. Um dos métodos mais utilizados é o método de Newton-Raphson (Silva, 2019).

O método de Newton-Raphson é um método numérico utilizado em equações não-lineares, cujo objetivo é encontrar o valor de x para que a função $f(x)$ seja igual a zero.

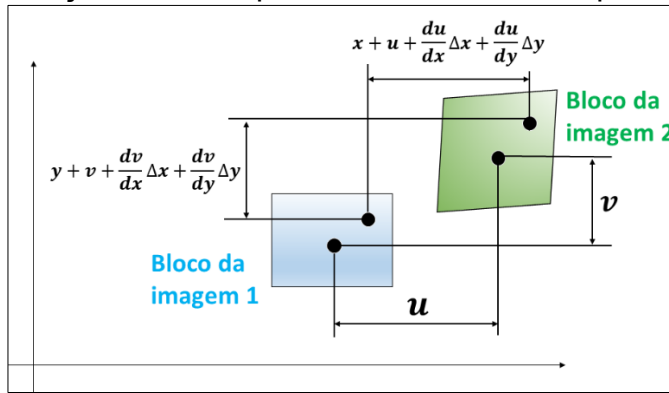
De acordo com Bing et. al. (2006), este método considera a deformação ao comparar duas imagens, partindo do pressuposto que cada ponto (x, y) da primeira imagem possui um ponto (x', y') correspondente na outra imagem, relacionando-os através das equações Eq.(15) e Eq.(16).

$$x' = x + u + \frac{du}{dx} \Delta x + \frac{du}{dy} \Delta y \quad (15)$$

$$y' = y + v + \frac{dv}{dx} \Delta x + \frac{dv}{dy} \Delta y \quad (16)$$

Sendo u e v , deslocamentos horizontal e vertical do centro do bloco, Δx e Δy , as distâncias de (x, y) ao centro do bloco, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Ilustração da correspondência entre blocos pelo método de Newton-Raphson



Fonte: Adaptado de Bing et. al. (2006)

Dessa forma, o sistema apresenta seis parâmetros que são relacionados em uma função de minimização, apresentada na Eq.(17).

$$T = \left(u, v, \frac{du}{dx}, \frac{du}{dy}, \frac{dv}{dx}, \frac{dv}{dy} \right) \quad (17)$$

O processo iterativo é iniciado com um valor aleatório T_0 e, atualizado a cada loop com um fator de correção.

Dessa forma, o método é capaz de extrair informações de engenharia de um fenômeno físico utilizando somente o registro de imagens do processo.

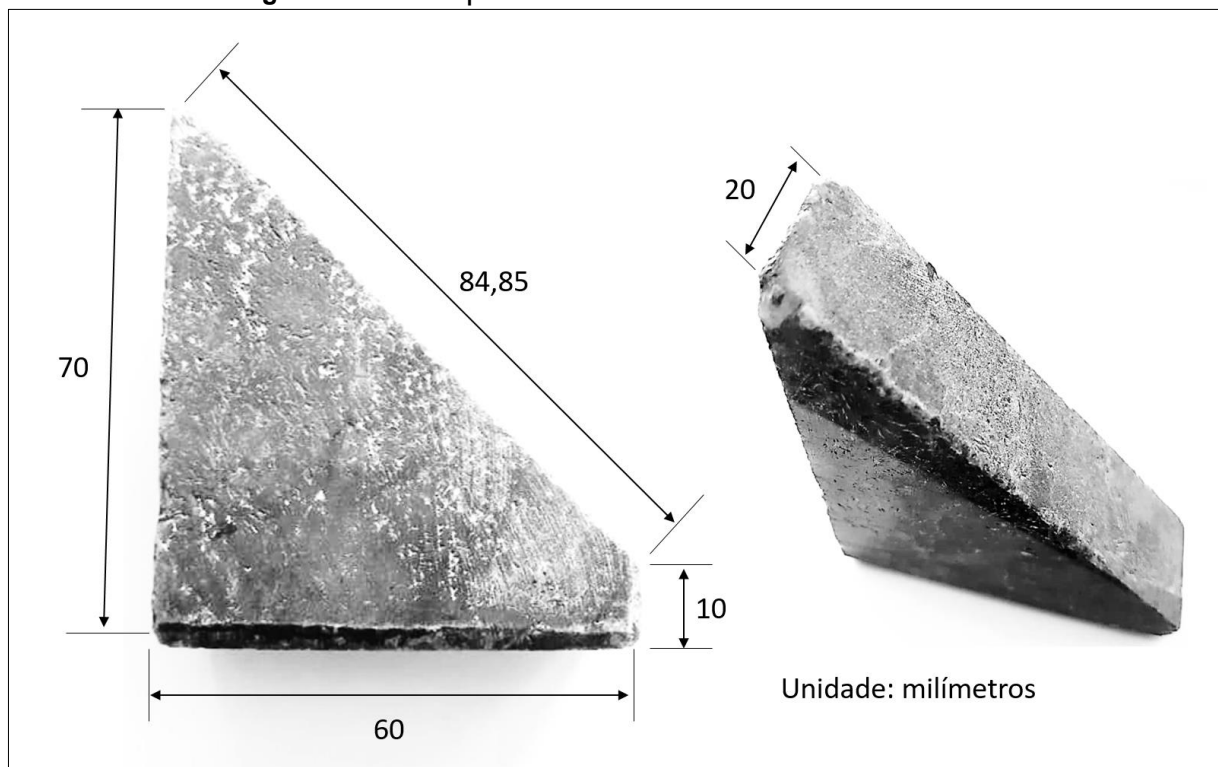
5. ENSAIO DE FALHA DE CONTATO INTERFACIAL ROCHA-ARGAMASSA

O ensaio envolveu a preparação e gravação dos corpos de prova e a textura granular aleatória na superfície de monitoramento.

5.1. Preparação da Rocha

Para analisar o comportamento de zona coesiva na interface rocha-argamassa, foram utilizadas amostras de granito, fornecidas pela empresa Marmoraria Cataratas, localizada em Foz do Iguaçu, Paraná. Foram realizados cortes para modelar um plano inclinado que simula a superfície da rocha onde o concreto é assentado durante um processo de concretagem da construção civil. Para fins de padronização das amostras, a superfície de contato da rocha foi lixada com uma lixa nº36 de ferro K-240, no sentido longitudinal da inclinação. Na Figura 20 são apresentadas as dimensões das amostras de rocha.

Figura 20 – Principais dimensões da amostra de rocha



Fonte: O autor.

5.2. Preparação da Argamassa

O traço da argamassa desenvolvida neste trabalho é apresentado na Tabela

1.

Tabela 1- Traço da argamassa utilizada

Material	Proporção
Cimento	1
Cal	0.5
Areia	4.5
a/C	0.7

De acordo com a NBR NM 67, realizou-se o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone. A argamassa apresentou um abatimento de 7 cm, conforme a Figura 21.

Figura 21 – Determinação da consistência da argamassa pelo ensaio de abatimento

Fonte: O autor.

Foram preparados seis corpos de prova de argamassa, de acordo com a NBR 5738, para se obter as propriedades da argamassa utilizadas para calibrar o modelo numérico (Figura 22).

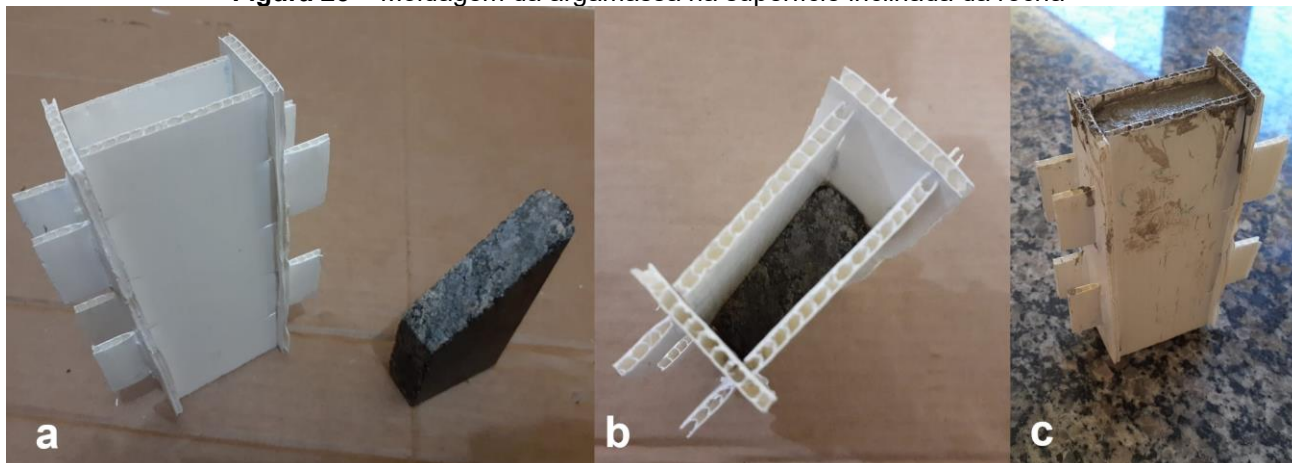
Figura 22 – Moldagem dos corpos de prova

Fonte: O autor.

5.3. Preparação do Corpo de Prova Rocha-Argamassa

Para realizar o assentamento da argamassa na superfície inclinada da rocha, foram desenvolvidos moldes de PVC, conforme a Figura 23.

Figura 23 – Moldagem da argamassa na superfície inclinada da rocha



Fonte: O autor.

Quarenta e oito horas depois, os corpos de prova foram desmoldados, conforme a Figura 24.

Figura 24 – Corpo de prova rocha-argamassa recém-desmoldado



Fonte: O autor.

Ao todo foram construídos seis corpos de prova rocha-argamassa.

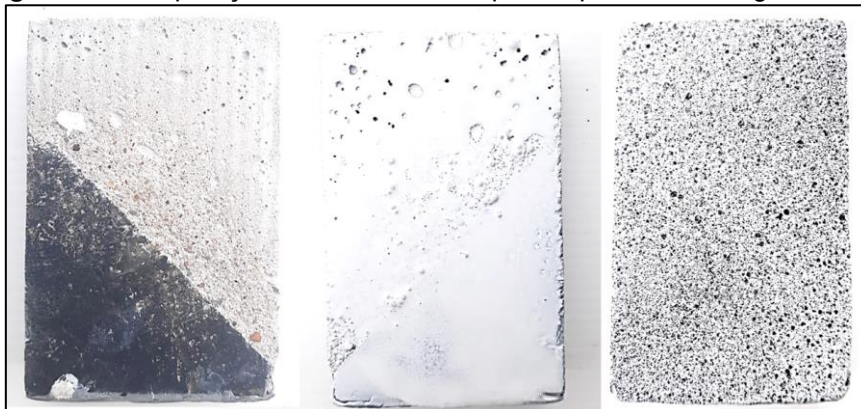
Ressalta-se que, como todos os corpos de prova apresentam uma interface de contato de 45° , em todos os ensaios, a interface experimentará a mesma tensão normal e cisalhante. Dessa forma, os parâmetros obtidos neste trabalho são válidos apenas para este caso em particular.

6. MONITORAMENTO DO ENSAIO PELO MÉTODO CID

6.1. Preparação do Corpo de prova (Textura)

Seguindo as boas práticas de preparação de ensaio para aplicação do método CID, inicialmente, os corpos de prova receberam uma camada de tinta branca. Posteriormente, utilizou-se tinta preta *spray* para criar uma textura aleatória de granulometria fina (Figura 25).

Figura 25 – Preparação da textura dos corpos de prova rocha-argamassa



Fonte: O autor.

6.2. Processamento do Ensaio

O ensaio de rompimento da interface de contato entre rocha e a argamassa foi realizado utilizando a prensa hidráulica apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Equipamentos laboratoriais utilizados na realização do ensaio



Fonte: o Autor

Para garantir a iluminação adequada e constante, posicionou-se uma lâmpada *led* na frente da superfície do ensaio.

O monitoramento do ensaio foi realizado utilizando uma câmera digital Sony Alpha a5000 (*Mirrorless Digital Camera ILCE5000L/S*), de 20,1 *megapixels* de resolução, apresentada na Figura 27. As principais características técnicas da câmera são apresentadas na Tabela 2.

Figura 27 – Câmera digital Sony a5000



Fonte: o Autor

Tabela 2- Características técnicas da câmera digital

Características	Valores
Lente objetiva	E16 – 50 mm
Resolução máxima da Fotografia	20 MP: 5456 x 3632
Velocidade de gravação de vídeo	3,5 fps
Formato de gravação de vídeo	AVCHD 1920 x 1080i / 60 fps (24 Mbps)

A disposição do equipamento durante o ensaio é apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Equipamentos utilizados para o monitoramento da superfície de interesse

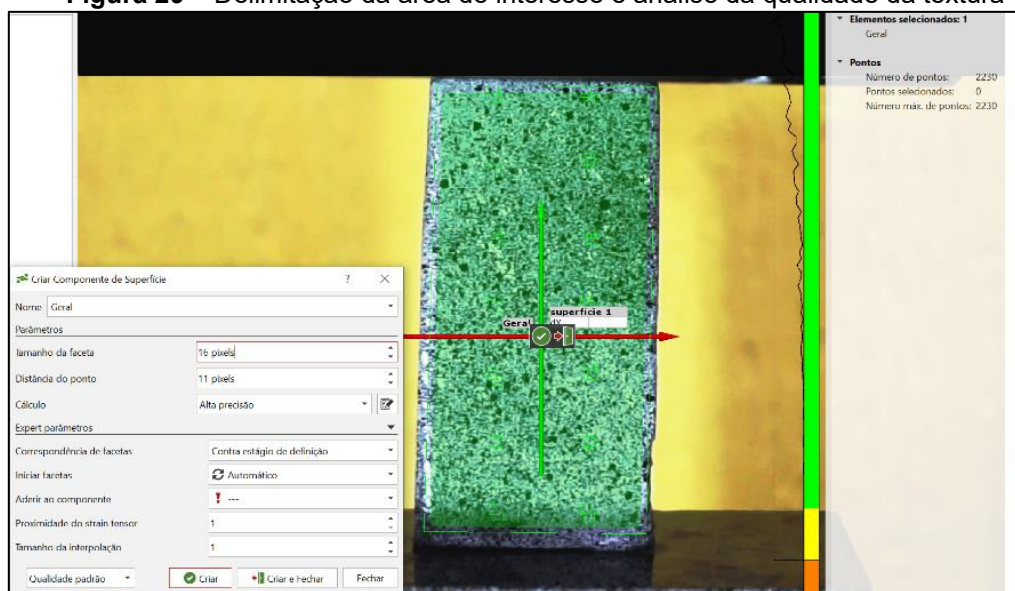


Fonte: o Autor

Para verificar e ajustar a captura de imagens, realizou-se um ensaio teste. Durante o ensaio, constatou-se que o fenômeno físico de ruptura da interface de contato entre a rocha e a argamassa ocorreria de forma abrupta, tornando impossível a sua captura por meio de imagens fotográficas a cada acréscimo de carga. Por isso, optou-se pela gravação de vídeo de alta resolução do ensaio. Embora o procedimento exija um alto custo computacional devido ao volume de frames que são correlacionados durante o processamento, porém, garante a captura total e precisa do fenômeno de ruptura da interface.

Durante a configuração do processamento do ensaio teste, delimitou-se a área da imagem para se configurar a qualidade da superfície monitorada. Na Figura 29 é apresentada a delimitação da área de interesse do ensaio (área cor verde na região central do corpo de prova) e o gráfico de qualidade dos blocos gerados de acordo com a quantidade de pixels considerada por bloco. A qualidade é apresentada na legenda, localizada no lado direito da figura. Observa-se que, considerando blocos de 16x16 pixels, serão gerados 2.230 blocos, e todos se encontram na zona verde da legenda, ou seja, qualidade mínima alcançada para garantir precisão nos resultados.

Figura 29 – Delimitação da área de interesse e análise da qualidade da textura

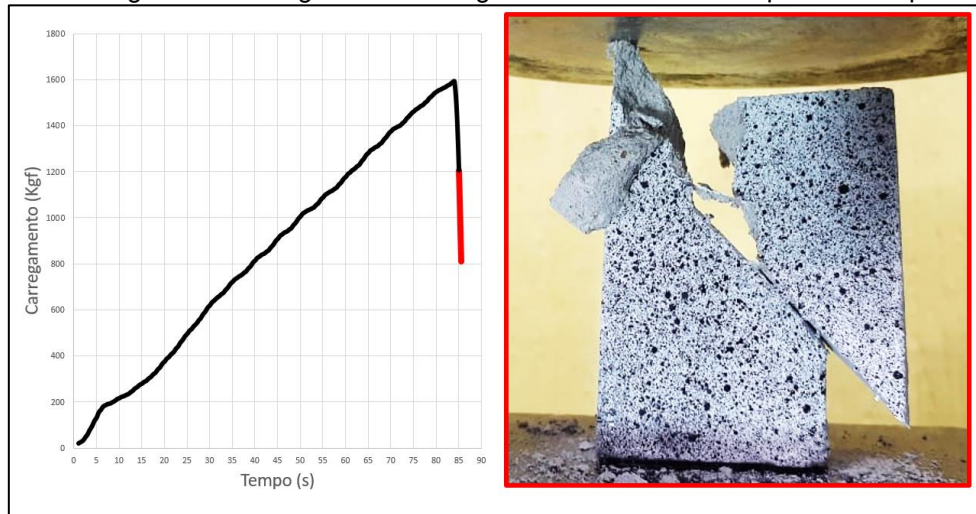


Fonte: o Autor

6.3. Pós-processamento CID (Resultados)

O ensaio teste durou aproximadamente 90 segundos. A ruptura do corpo de prova na interface rocha-argamassa ocorreu aos 84 segundos, após receber um carregamento de 1593 Kgf, conforme é apresentado na Figura 30.

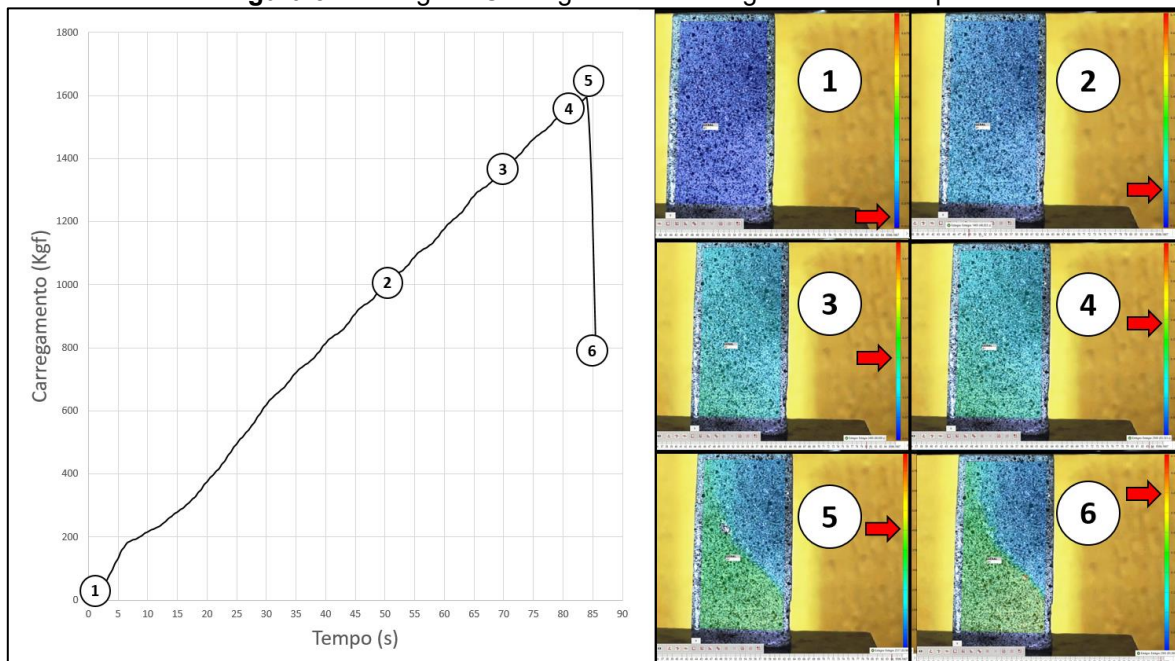
Figura 30 – Registro do carregamento e fotografia do momento de ruptura do corpo de prova



Fonte: o Autor

Na Figura 31, são apresentadas imagens processadas com resultados CID de deslocamento vertical, durante a realização do primeiro ensaio registrado pela gravação de vídeo de alta resolução.

Figura 31 – Imagens CID e gráfico de carregamento no tempo



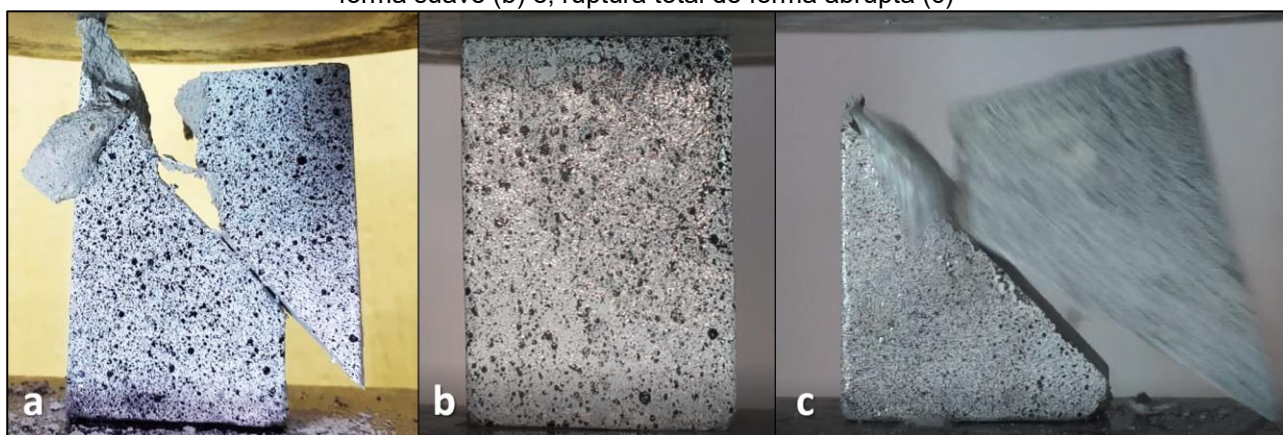
Fonte: o Autor

Os resultados dos campos de deformação e deslocamentos temporais das imagens correlacionadas, juntamente com o histórico de carregamento da prensa hidráulica, possibilitam a calibração de modelos numéricos.

6.3.1. Tabulação dos Resultados dos Ensaios

Ao todo, foram realizados seis ensaios em corpos de prova rocha-argamassa (CP-RA). Em dois ensaios, ocorreu a ruptura da argamassa na região central e a ruptura parcial da interface de contato rocha-argamassa (a). Em dois ensaios ocorreu a ruptura total da interface de contato de forma suave (b) e, em dois ensaios, ocorreu a ruptura total da interface de forma abrupta (c), conforme apresentado na **Figura 32**.

Figura 32 – Tipos de ruptura obtidas durante os ensaios: ruptura parcial da interface (a), ruptura total de forma suave (b) e, ruptura total de forma abrupta (c)



Na Tabela 3 são apresentados os resultados de carregamento de ruptura e tempo de ensaio, obtidos da prensa hidráulica.

Tabela 3 – Dados de ensaio dos corpos de prova rocha-argamassa

Código	Tempo de ensaio [s]	Carregamento Máximo [Kgf]	Descrição da Ruptura de interface
CP-RA-01	84	1593	Parcial
CP-RA-02	65	1889	Total de forma suave
CP-RA-03	120	1350	Total de forma abrupta
CP-RA-04	102	1487	Total de forma abrupta
CP-RA-05	76	1792	Total de forma suave
CP-RA-06	55	1654	Parcial

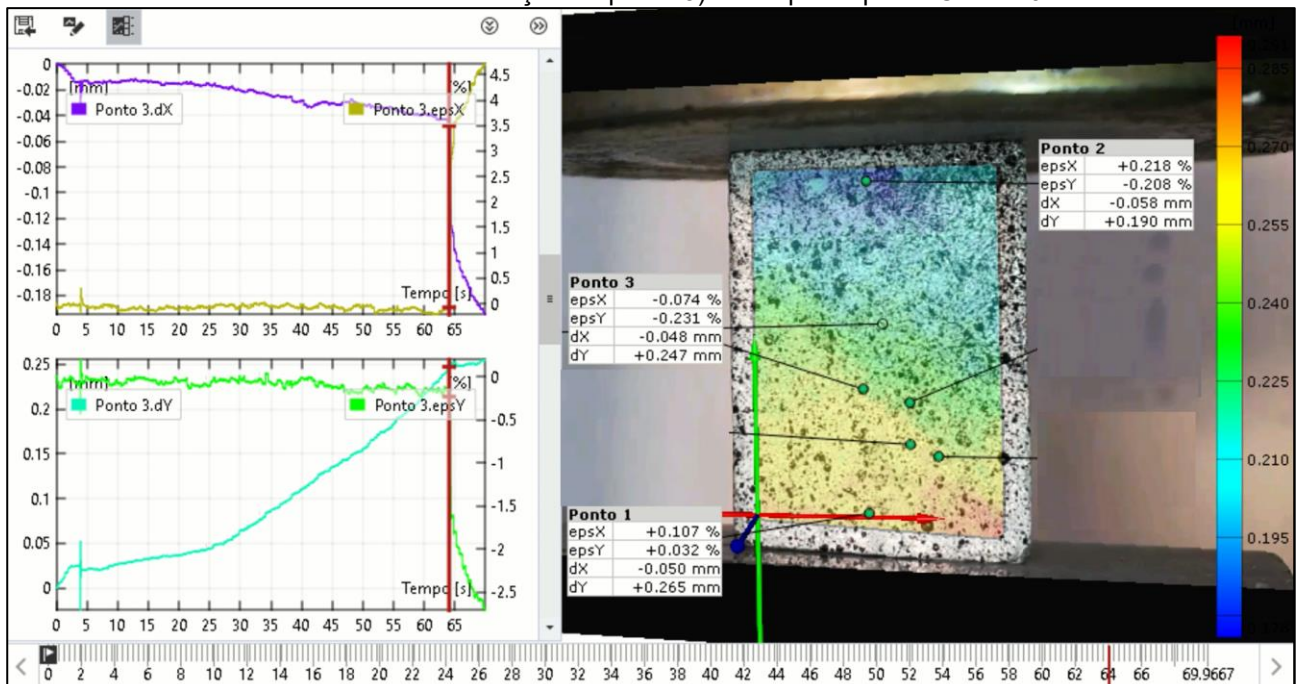
Para calibrar o modelo numérico não linear de interface coesiva, escolheu-se o ensaio de ruptura suave CP-RA-02.

Na Figura 33 são apresentados os três pontos de monitoramento escolhidos nos corpos de prova para se coletar dados de deslocamento das imagens processadas pelo método de correlação de imagens digitais.

Figura 33 – Pontos de monitoramento (CID)

Fonte: O autor.

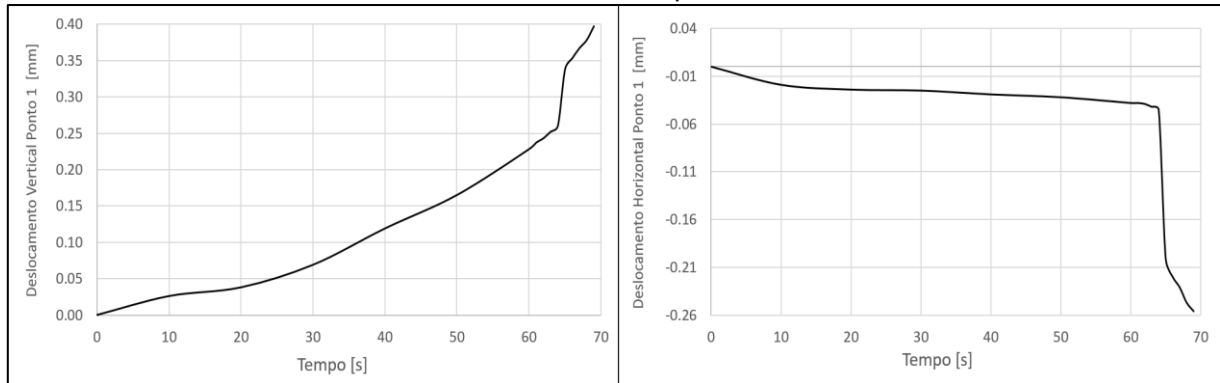
Na Figura 34 são apresentados os resultados do processamento instantes antes da ruptura do ensaio do CP-RA-02.

Figura 34 – Resultados CID (campo de deslocamento vertical, pontos de monitoramento e gráficos de deslocamento e deformação do ponto 3) do corpo de prova CP-RA-02.

Fonte: O autor.

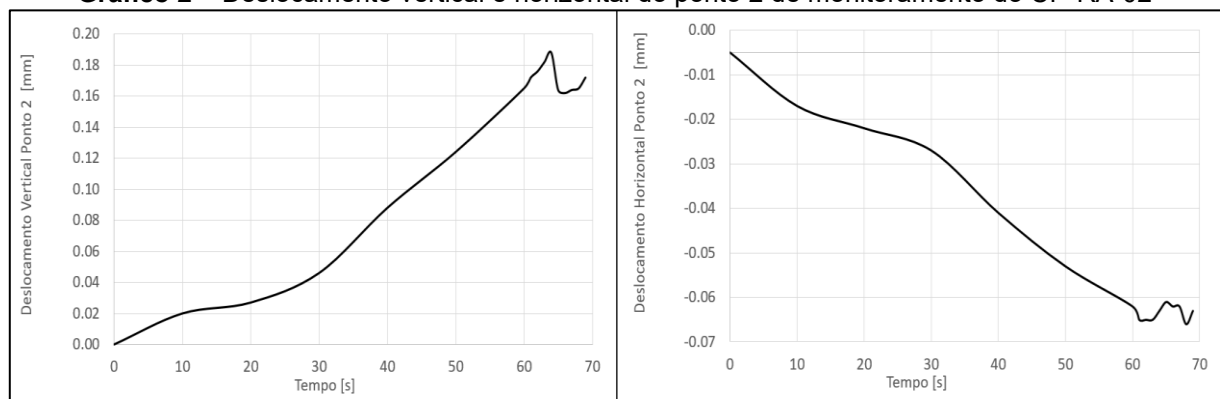
Nos Gráfico 1 até o Gráfico 3 são apresentados os resultados de deslocamento na direção vertical (y) e horizontal (x) de cada ponto de monitoramento do CP-RA-02.

Gráfico 1 – Deslocamento vertical e horizontal do ponto 1 de monitoramento do CP-RA-02



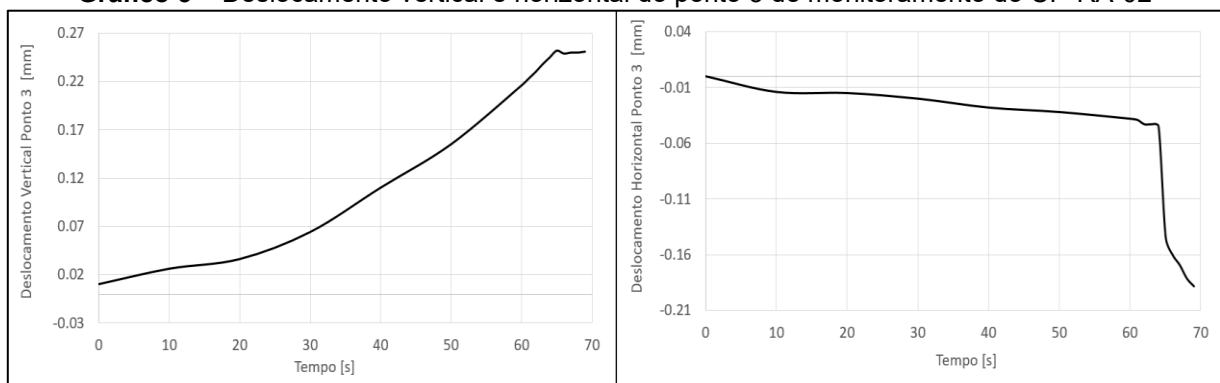
Fonte: O autor.

Gráfico 2 – Deslocamento vertical e horizontal do ponto 2 de monitoramento do CP-RA-02



Fonte: O autor.

Gráfico 3 – Deslocamento vertical e horizontal do ponto 3 de monitoramento do CP-RA-02



Fonte: O autor.

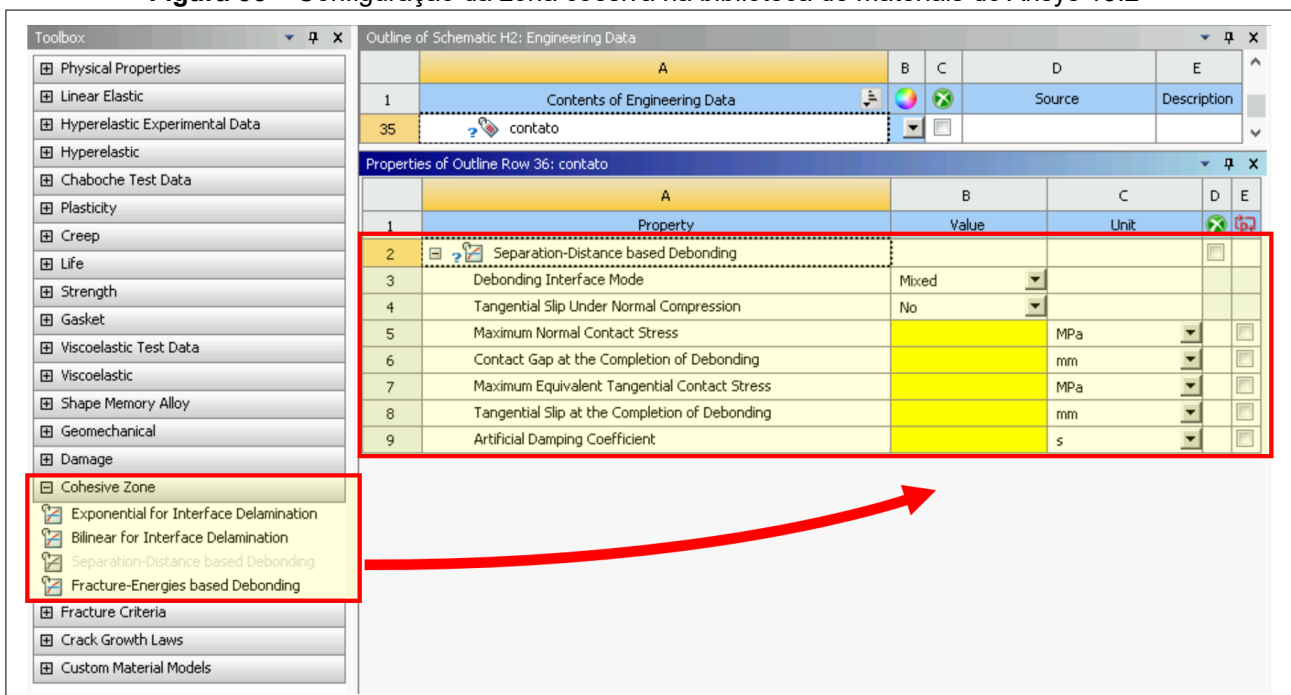
7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA RUPTURA INTERFACIL ROCHA E ARGAMASSA

A plataforma *Ansys* possui diversos programas de análises numéricas baseado no método dos elementos finitos e volumes finitos. O *Workbench* é o ambiente da *Ansys* que agrupa todos os pacotes de simulação computacional. Esse ambiente permite realizar acoplamentos, de forma fácil e intuitiva, entre as simulações multifísicas.

Dentre esses pacotes, o *Mechanical* permite realizar simulações estruturais, desde as mais simples, como a análise estrutural estática, até análises mais complexas envolvendo não linearidade do material, da geometria ou do contato.

As análises não lineares de contato (ruptura de interfaces por descolamento), podem ser modeladas por meio dos métodos de zona coesiva disponíveis na biblioteca de materiais e métodos, conforme apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Configuração da zona coesiva na biblioteca de materiais do Ansys 19.2

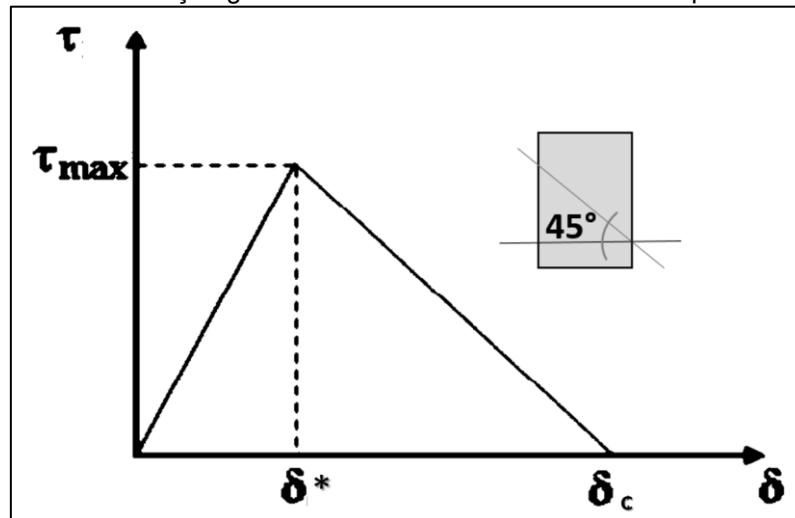


Fonte: O autor.

Para o desenvolvimento do modelo numérico de ruptura na interface de contato rocha-argamassa do corpo de prova CP-RA-02, decidiu-se utilizar o método de zona coesiva de Descolamento baseado na Distância de separação, semelhante ao método da Lei Bilinear. A única diferença está na flutuação da distância de separação para o início da danificação do elemento de interface (δ^*). Dessa forma, enquanto o elemento de contato da ZC não atingir a tensão máxima de tração ou de cisalhamento, o deslocamento será regido pela lei generalizada de Hooke. O deslocamento que defini o início da danificação

do elemento de contato será aquele que o elemento apresentar no momento que atingir a tensão máxima permitida pelo MZC. Então, inicia-se a danificação e o elemento começa a perder rigidez até alcançar a distância limite de separação, onde ocorre a ruptura do elemento de contato. Neste trabalho, o modo II de fratura é predominante, uma vez que a interface de contato é comprimida o tempo todo durante o ensaio. Dessa forma, a lei de zona coesiva para o Modo II de descolamento é apresentada na Figura 36.

Figura 36 – Ilustração gráfica da Lei Bilinear de zona coesiva para o Modo II



Fonte: Adaptado de Krieger (2014).

7.1. Análise Estrutural Elástica Linear

Inicialmente, realizou-se uma simulação elástica linear para se analisar as tensões e deslocamentos na interface de contato do modelo no momento de aplicação do carregamento máximo da prensa (momento de ruptura do corpo de prova no ensaio). Dessa forma, foi possível estimar os valores iniciais para se calibrar os parâmetros do MZC.

Para a realização da análise numérica, foram adotadas as propriedades dos materiais apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4- Propriedades dos materiais

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de Poisson	Densidade [Kg/m³]
Argamassa	21*	0,2*	2350**
Granito	70*	0,25*	2650**

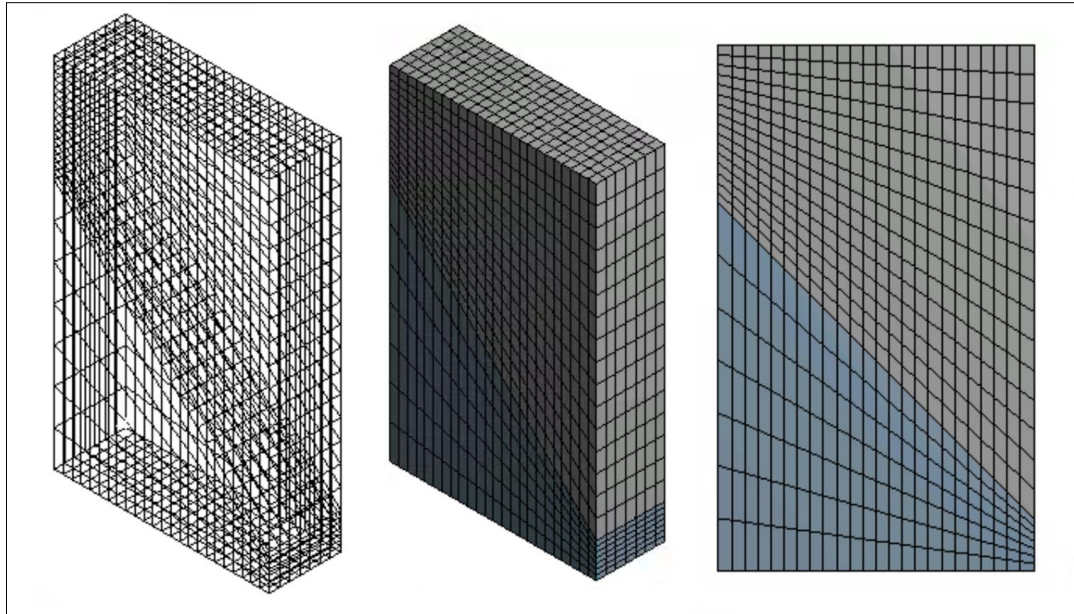
* Propriedades estimadas por meio dos resultados CID;

** Propriedades obtidas da literatura.

Malha

A malha é formada por elementos hexaédricos, solid186. Ao todo a malha é constituída por 18.775 nós e 3.864 elementos (Figura 37).

Figura 37 – Malha hexaédrica do modelo numérico

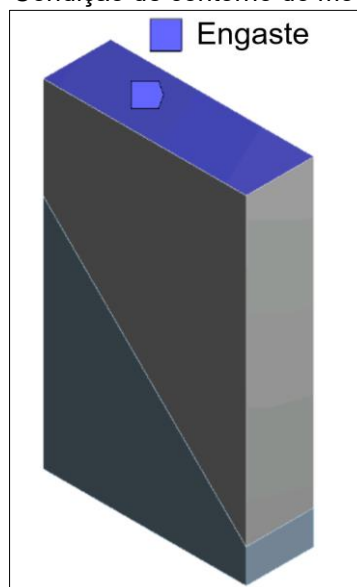


Fonte: O autor.

Condição de contorno

Para simular as condições da prensa hidráulica (compressão por meio da elevação da superfície inferior), aplicou-se a condição de engaste na superfície superior da argamassa, conforme a Figura 38.

Figura 38 – Condição de contorno do modelo numérico

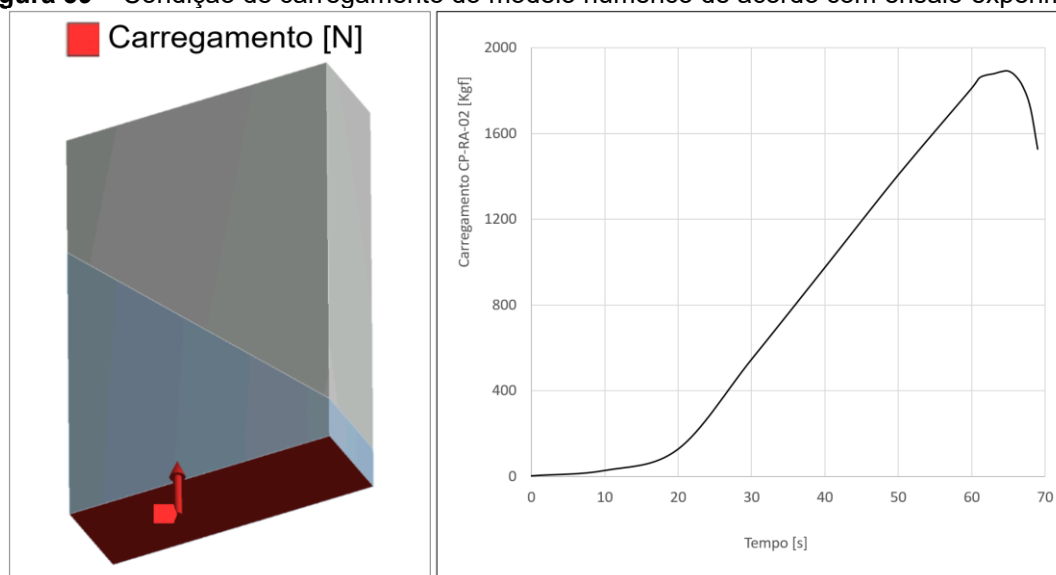


Fonte: O autor.

Condição de carregamento

Para simular as condições da prensa hidráulica (compressão por meio da elevação da superfície inferior), aplicou-se o carregamento na superfície inferior da rocha. Na Figura 39 são apresentados, a localização da aplicação do carregamento no modelo numérico e o gráfico de carregamento do ensaio CP-RA-02.

Figura 39 – Condição de carregamento do modelo numérico de acordo com ensaio experimental



Fonte: O autor.

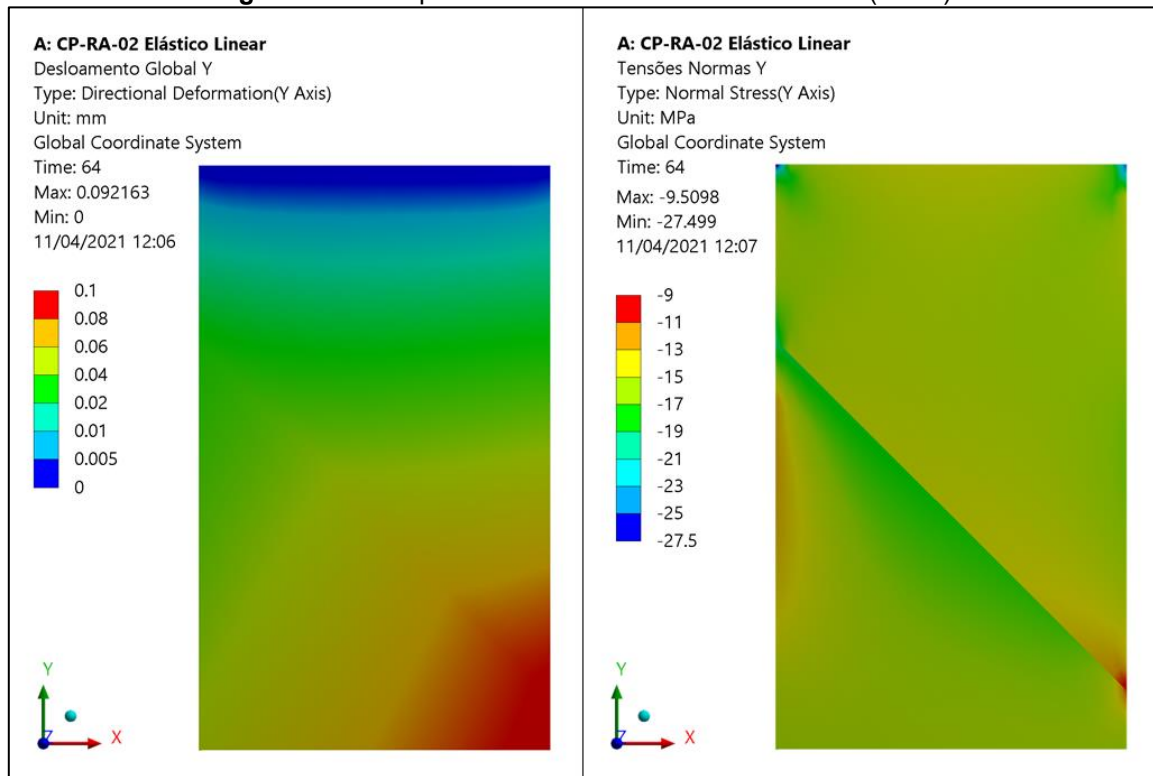
Resultados

A análise elástica linear foi realizada considerando que os nós da superfície de contato entre os materiais da malha apresentariam um comportamento proporcional ao carregamento, do início ao fim do ensaio, sem sofrer ruptura. Considerando essa hipótese, o modelo apresentou o comportamento descrito na Tabela 5.

Tabela 5 – Principais grandezas apresentadas no resultado do modelo elástico linear

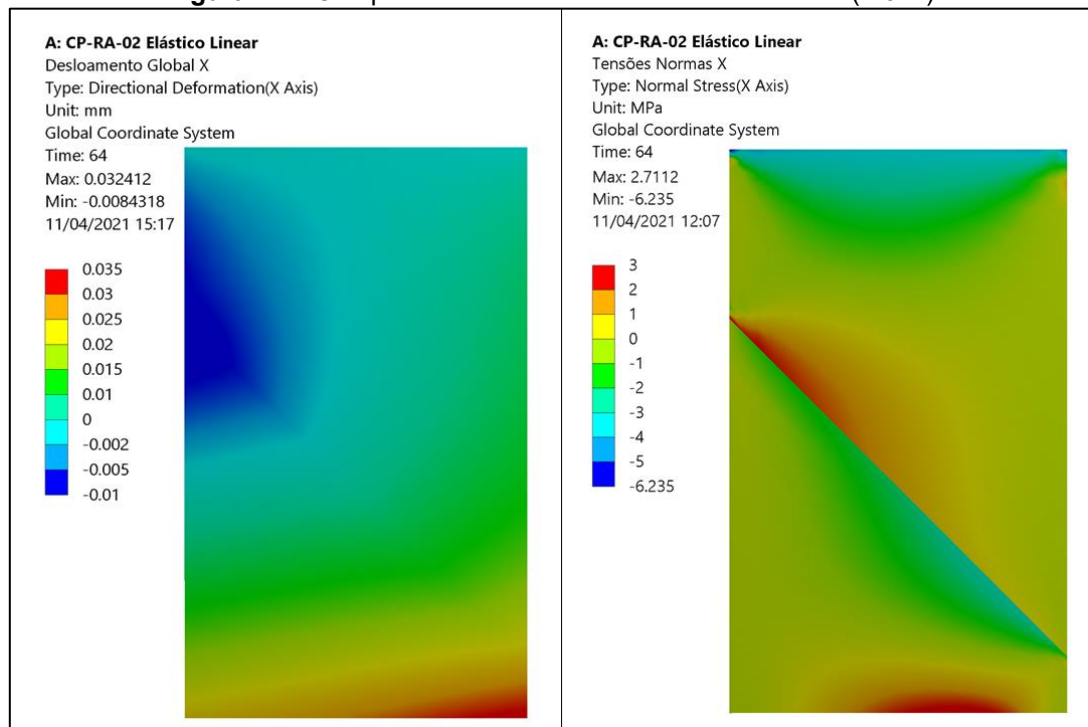
Tipo	Fenômeno Físico	Mínimo	Máximo
Global	Deslocamento Vertical Máximo [mm]	0	0,1
	Deslocamento Horizontal Máximo [mm]	-0,01	0,035
	Tensão Normal máxima na direção X [MPa]	-6,24	3
	Tensão Normal máxima na direção Y [MPa]	-27,5	-9
Contato	Deslizamento Máximo no contato [mm]	0	1,53e-5
	Tensão Máxima Cisalhante no contato [MPa]	4	11,3

Na Figura 40 são apresentados os resultados de deslocamentos e tensão vertical do modelo numérico no tempo $t=64s$ (momento da ruptura no ensaio experimental).

Figura 40 – Campo de deslocamento e tensão vertical (t=64s)

Fonte: O autor.

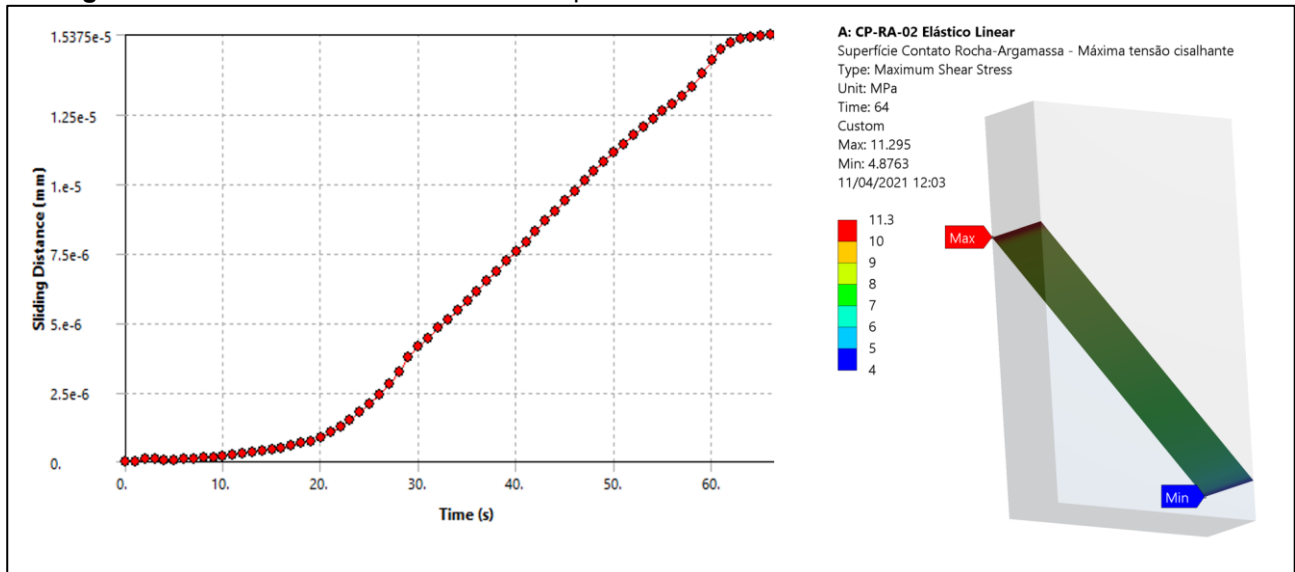
Na Figura 41 são apresentados os resultados de deslocamentos e tensão horizontal global do modelo numérico.

Figura 41 – Campo de deslocamento e tensão horizontal (t=64s)

Fonte: O autor.

Na Figura 42 são apresentados, o gráfico de deslizamento médio da interface de contato entre a rocha e a argamassa e o campo de tensão máxima cisalhante no contato.

Figura 42 – Gráfico de deslizamento e campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato

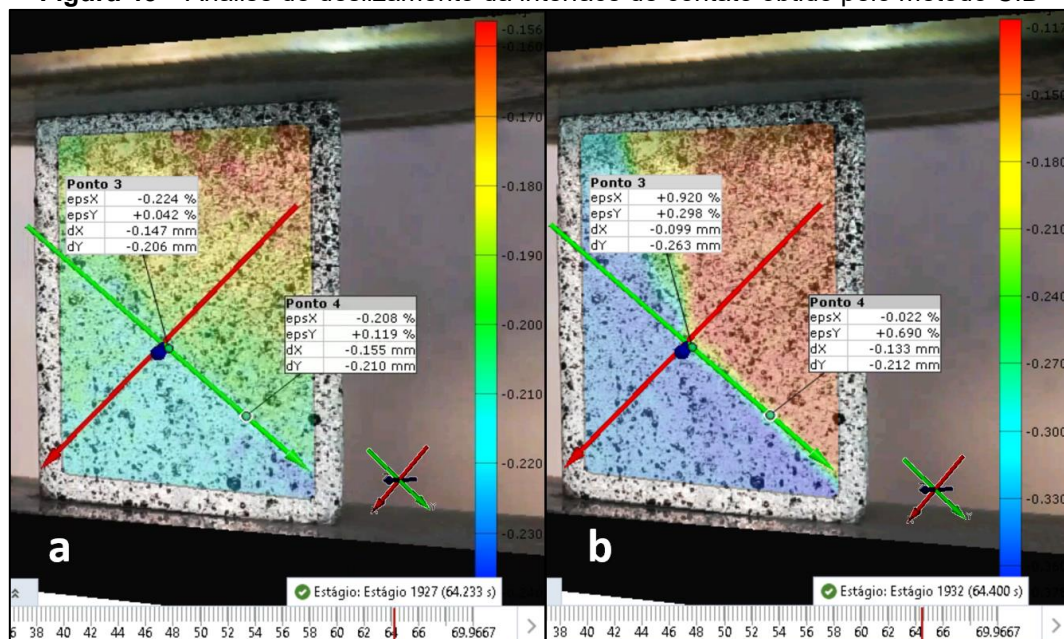


Fonte: O autor.

Por meio da análise da Figura 42, pode-se constatar que aos 64 segundos de ensaio, o deslizamento e a tensão máxima cisalhante, apresentados na interface de contato são $1,53\text{e-}5\text{mm}$ e $11,3\text{ MPa}$, respectivamente.

Pelo método CID, alinhando as coordenadas de referência no sentido da interface de contato, constatou-se que a interface apresentou um deslizamento de $0,206\text{ mm}$, milésimos de segundos antes da ruptura, conforme apresentado na Figura 43.

Figura 43 – Análise de deslizamento da interface de contato obtido pelo método CID



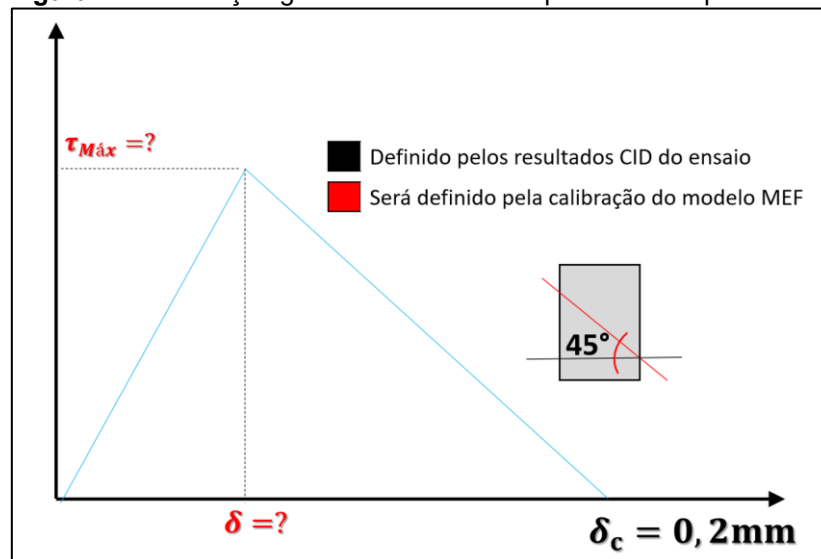
Fonte: O autor.

Dessa forma, conclui-se que, durante o ensaio de compressão axial, o corpo de prova não apresentou um comportamento elástico linear até o momento da ruptura ($t=64,233s$). O processo de danificação da interface de contato iniciou segundos antes ao atingir a tensão cisalhante máxima, que deve ser inferior aos 11,3 Mpa apresentado no modelo elástico linear (Figura 42).

Finalmente, para se iniciar a análise não linear e definir os parâmetros da zona coesiva por meio da lei bilinear, definiu-se o deslocamento de ruptura igual a 0,2 mm, conforme apresentado no ensaio experimental e monitorado pelo método CID (Figura 43).

Na Figura 44 é apresentada a montagem da Lei Bilinear para Zonas Coesivas desenvolvida parcialmente.

Figura 44 – Ilustração gráfica da Lei Bilinear parcialmente preenchida



Fonte: O autor.

7.2. Análise Estrutural Não Linear de Contato (Zona Coesiva – Lei Bilinear)

O modelo numérico não linear possui a mesma malha, condições de contorno e carregamento do modelo elástico linear apresentado na seção anterior. A principal diferença está no elemento de contato que recebeu a propriedade ZC modelada pela Lei Bilinear.

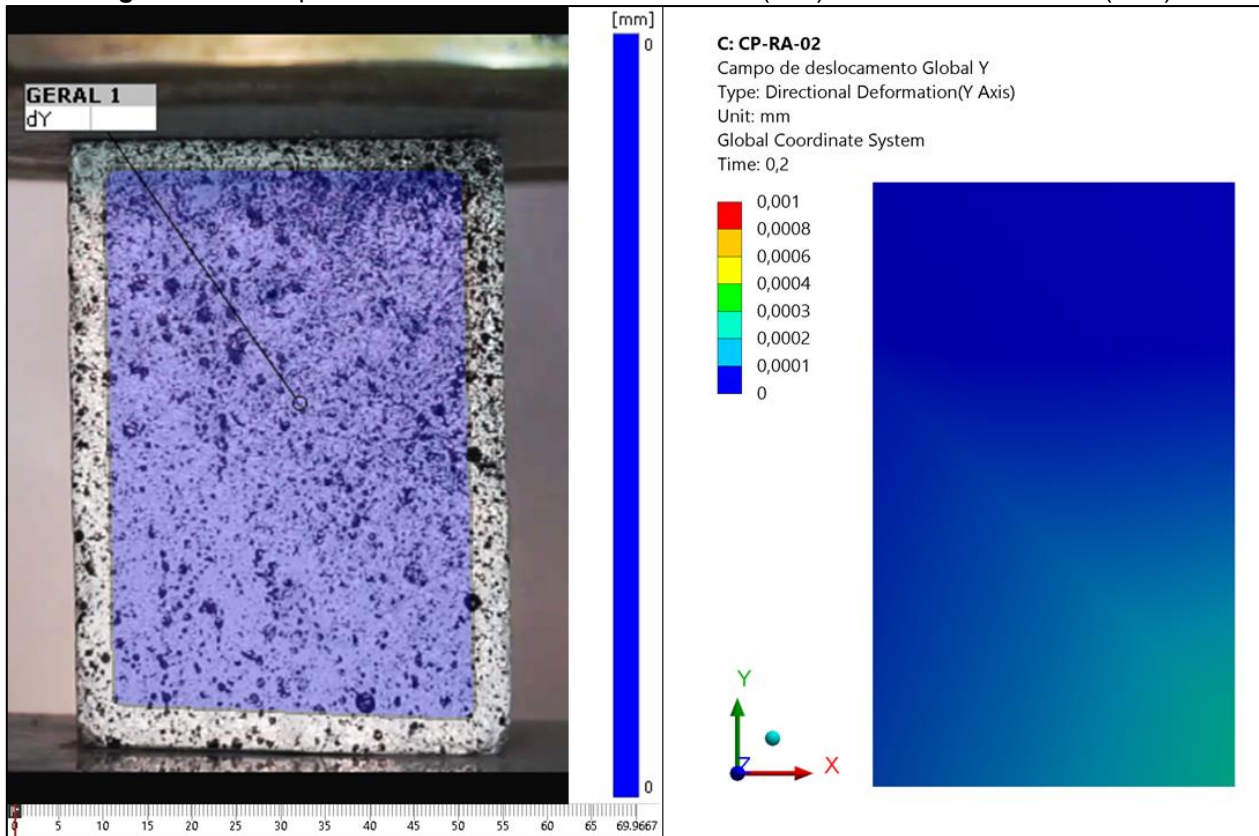
Para a definição das propriedades restantes da lei bilinear, realizou-se uma análise paramétrica, variando a tensão máxima cisalhante até que a ruptura do modelo ocorresse no tempo $t=64,2s$.

Na Tabela 6 são apresentados os principais resultados da análise paramétrica até se obter o comportamento esperado do modelo numérico e, calibra-lo com os resultados CID do ensaio experimental.

Tabela 6 - Resumo da análise paramétrica realizadas para calibrar o modelo numérico

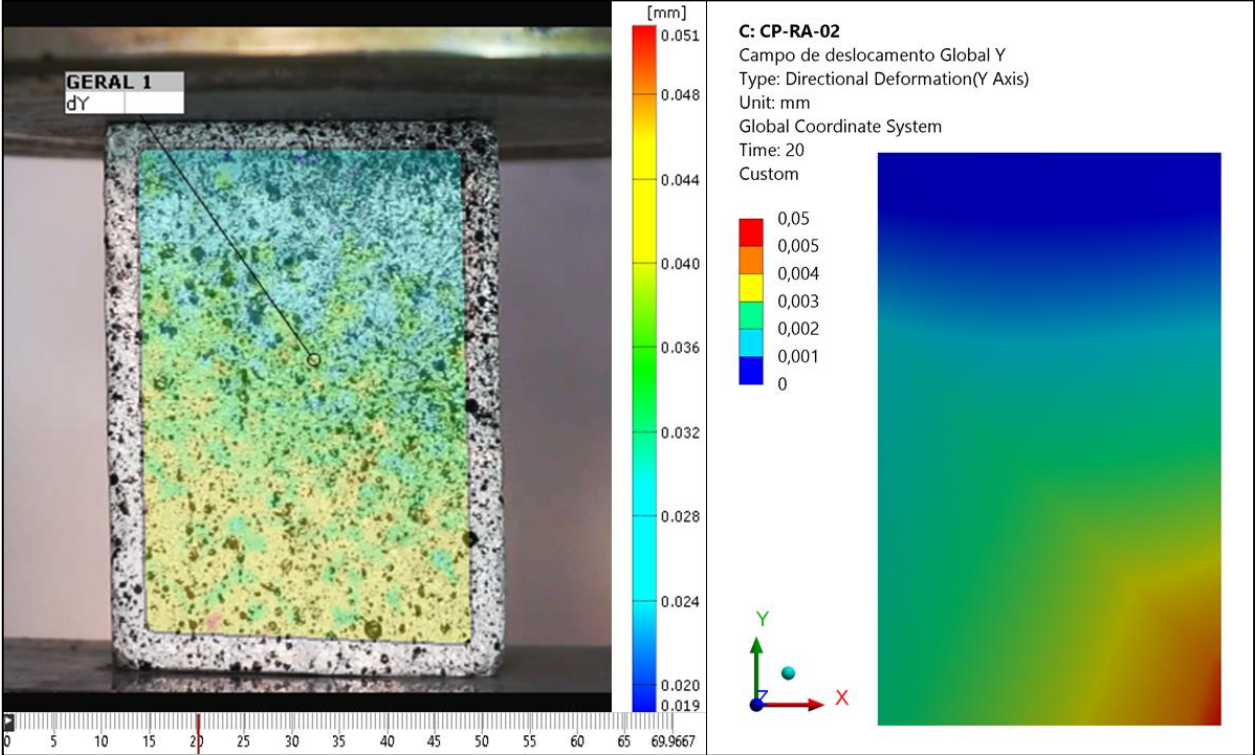
Nº	$\tau_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	Tempo de início de danificação [seg] ($\tau_{contato} > \tau_{m\acute{a}x}$)	Tempo de ruptura total [seg] ($\delta_{contato} > \delta_{m\acute{a}x}$)
1	11,3	0,2	60	-
2	10	0,2	55	-
3	8	0,2	48	67
4	7,5	0,2	46	66
5	7,2	0,2	45,5	64,4
6	7,15	0,2	45,4	64,2

Nas Figura 45 até a Figura 49, são apresentados os campos de deslocamento vertical (Y), do ensaio experimental (CID) e do modelo numérico (MEF), respectivamente.

Figura 45 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=0s)

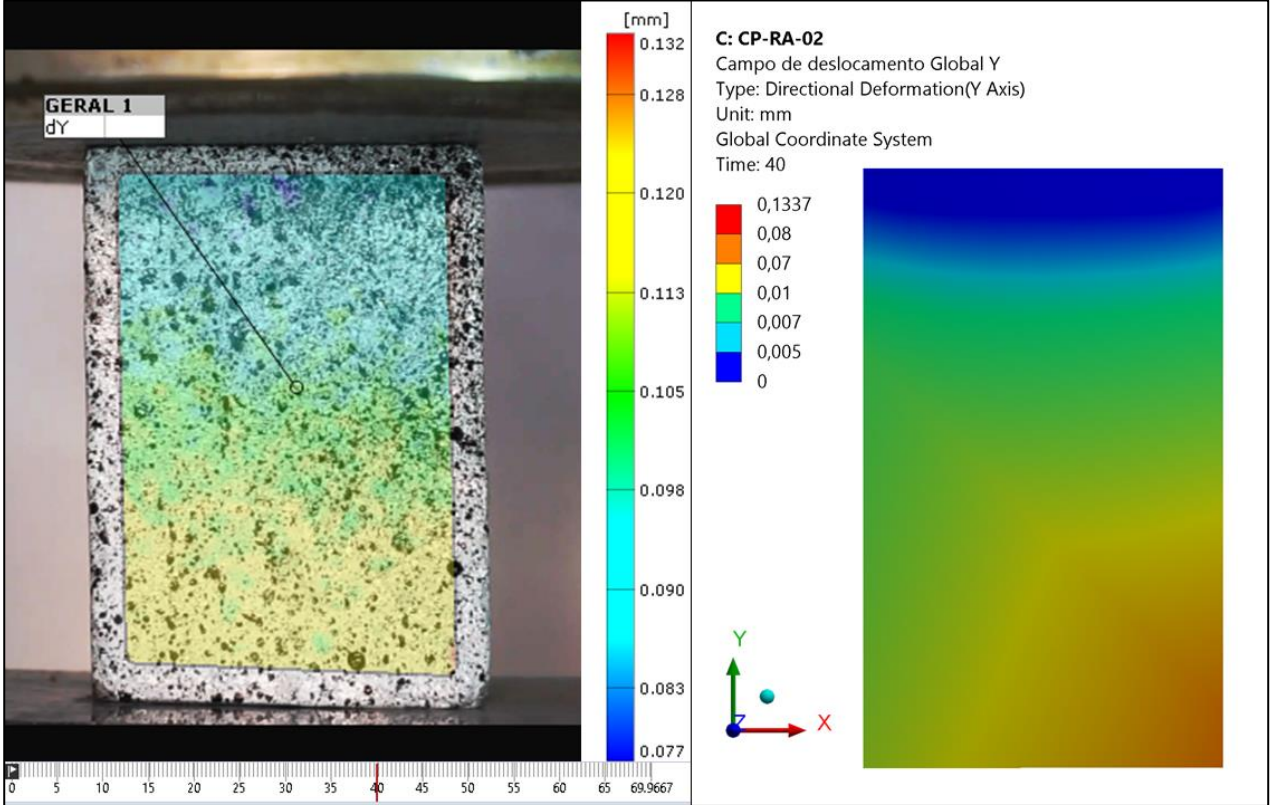
Fonte: O autor.

Figura 46 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=20s)



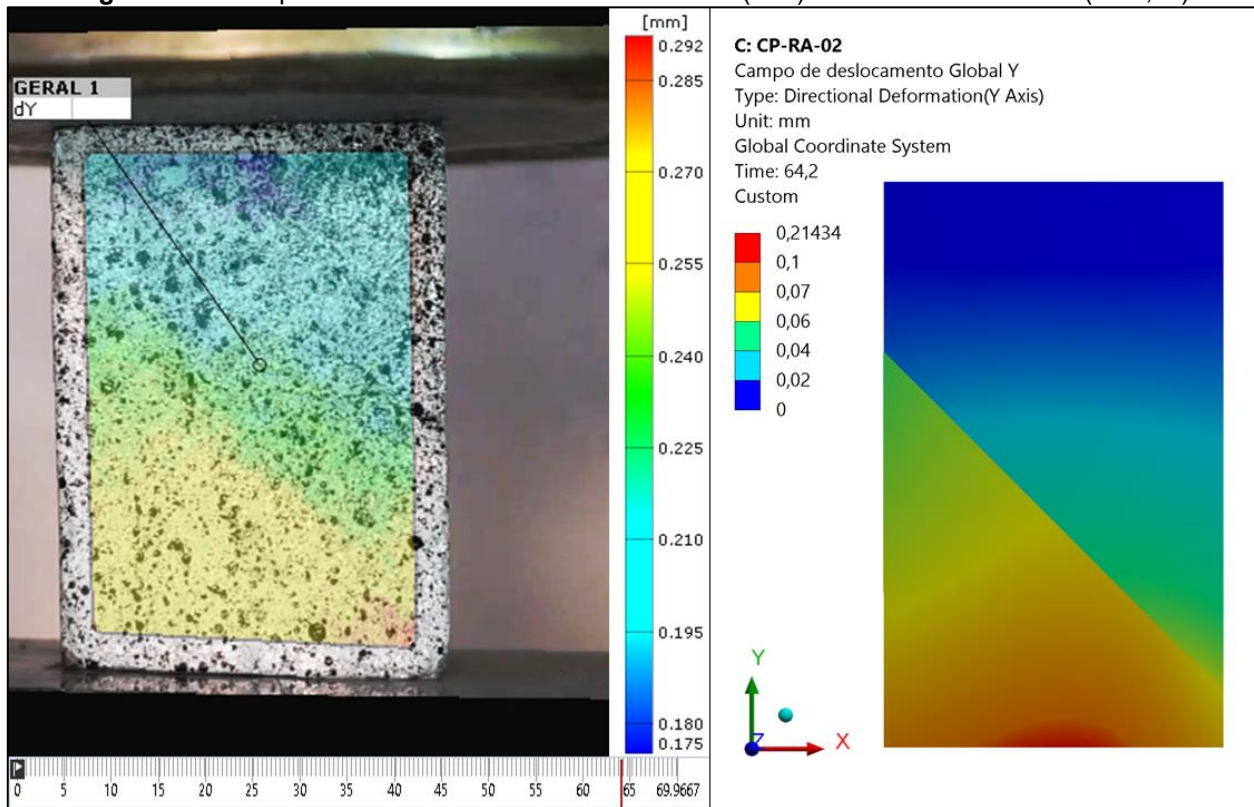
Fonte: O autor.

Figura 47 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=40s)



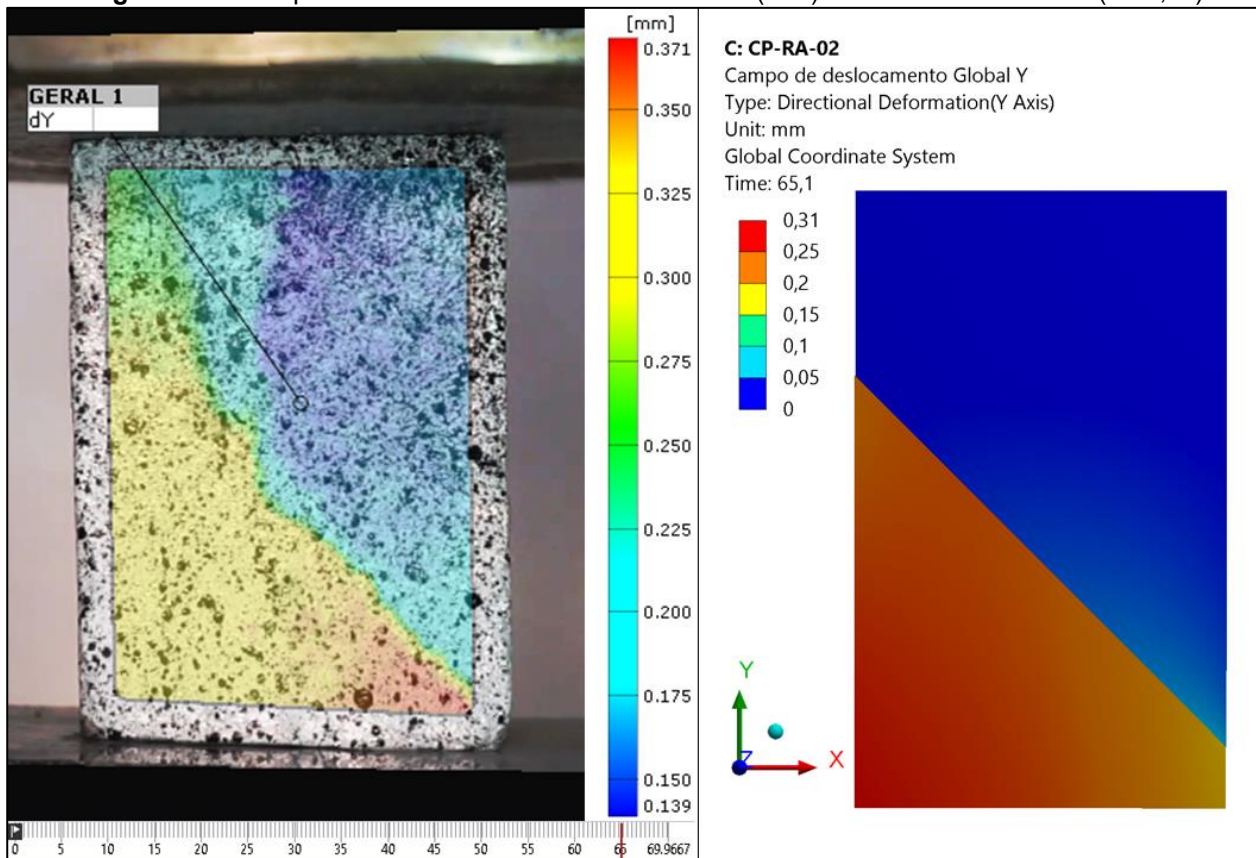
Fonte: O autor.

Figura 48 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico ($t=64,2s$)



Fonte: O autor.

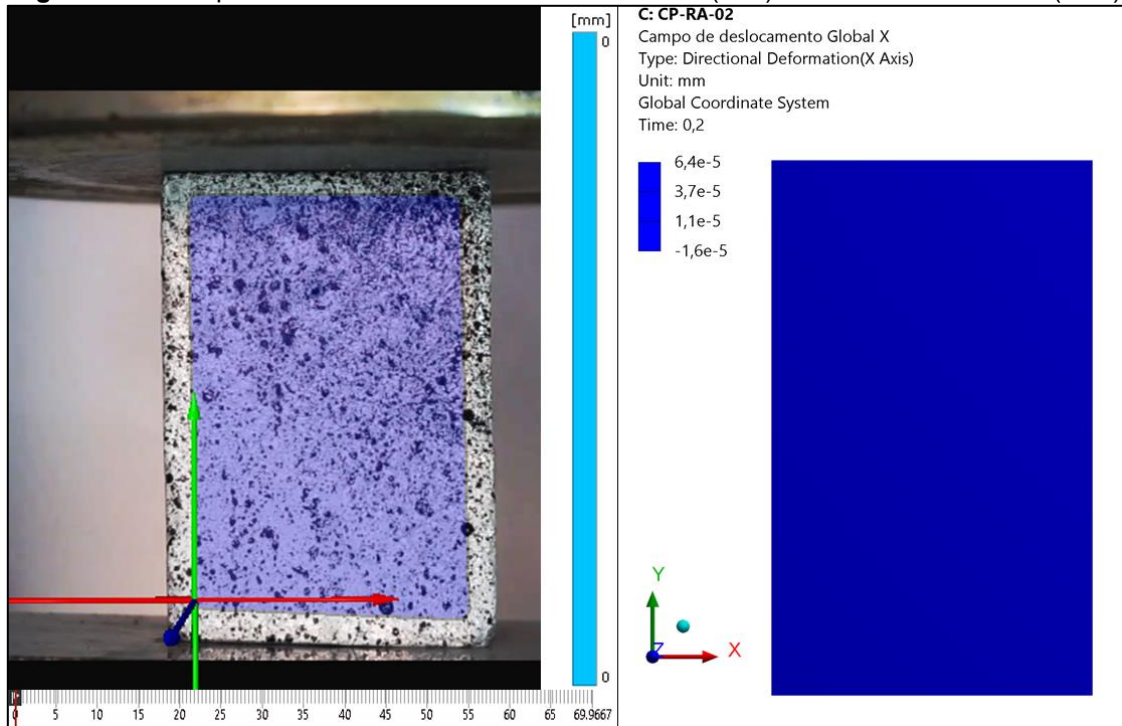
Figura 49 – Campo de deslocamento vertical do ensaio (CID) e do modelo numérico ($t=65,1s$)



Fonte: O autor.

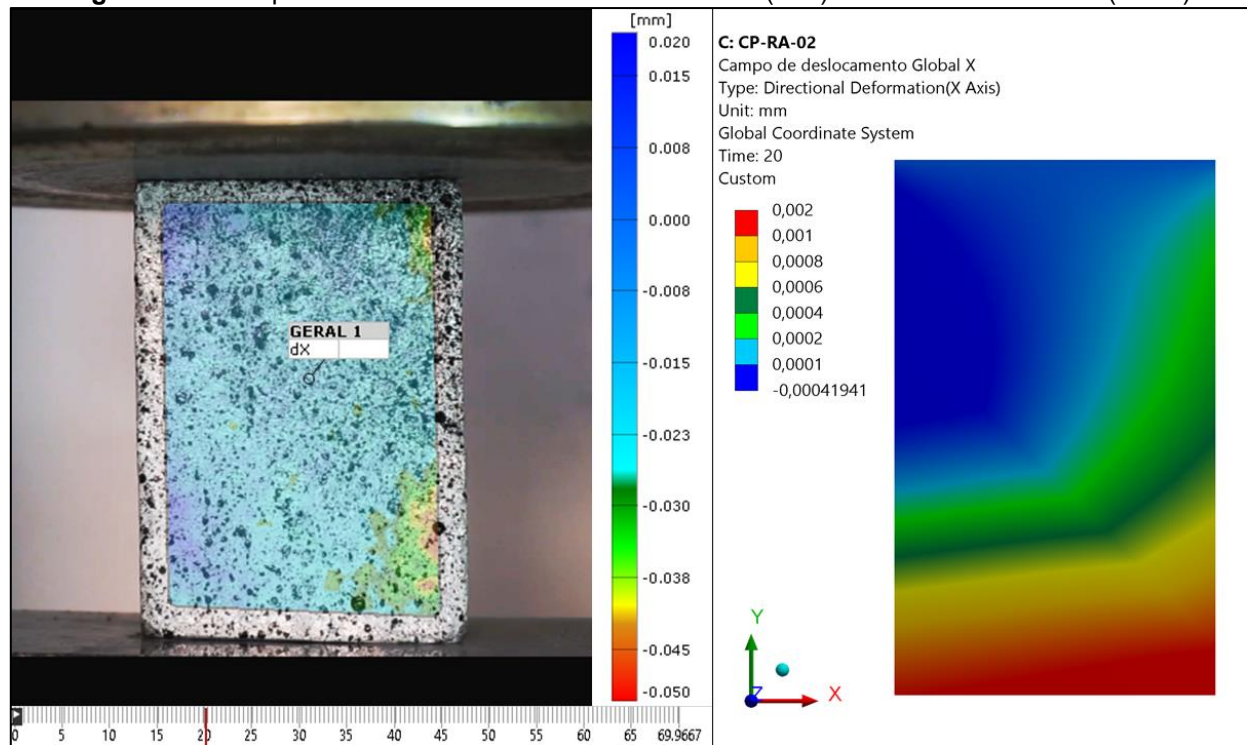
Nas Figura 50 até a Figura 54 são apresentados os campos de deslocamento horizontal (X), do ensaio experimental (CID) e do modelo numérico.

Figura 50 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=0s)



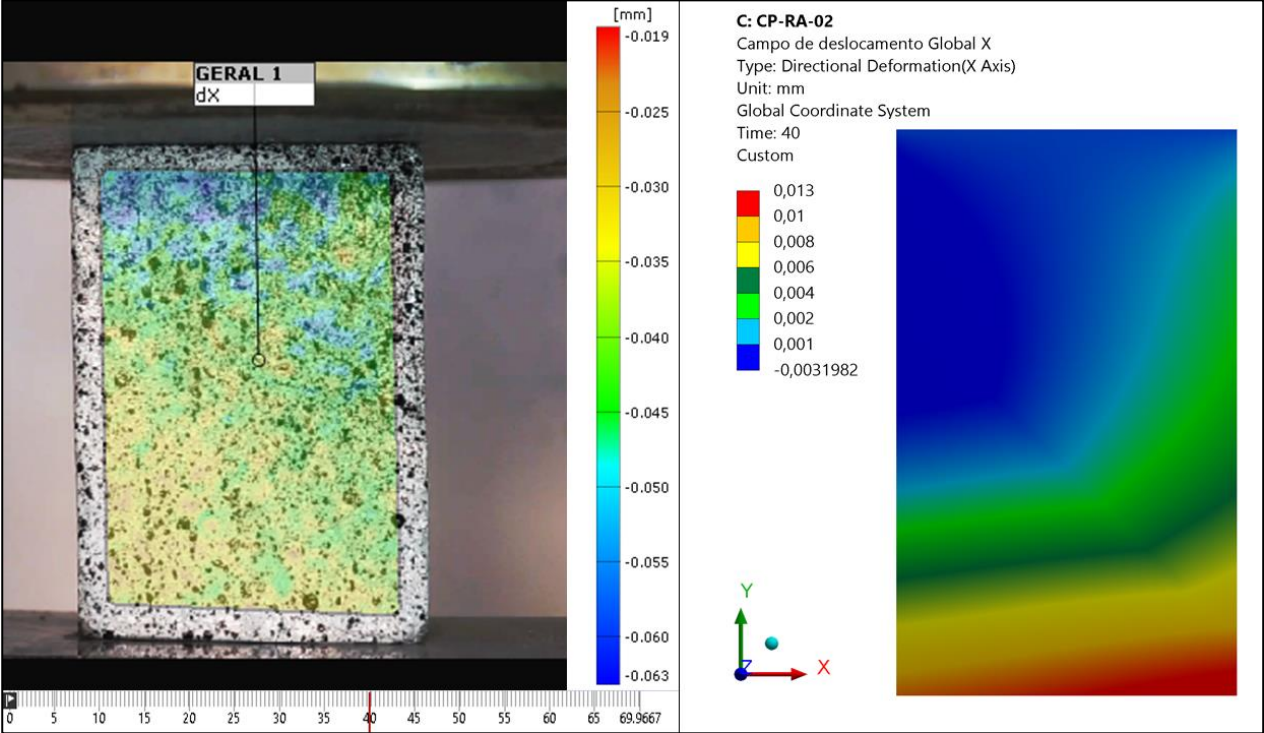
Fonte: O autor.

Figura 51 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=20s)



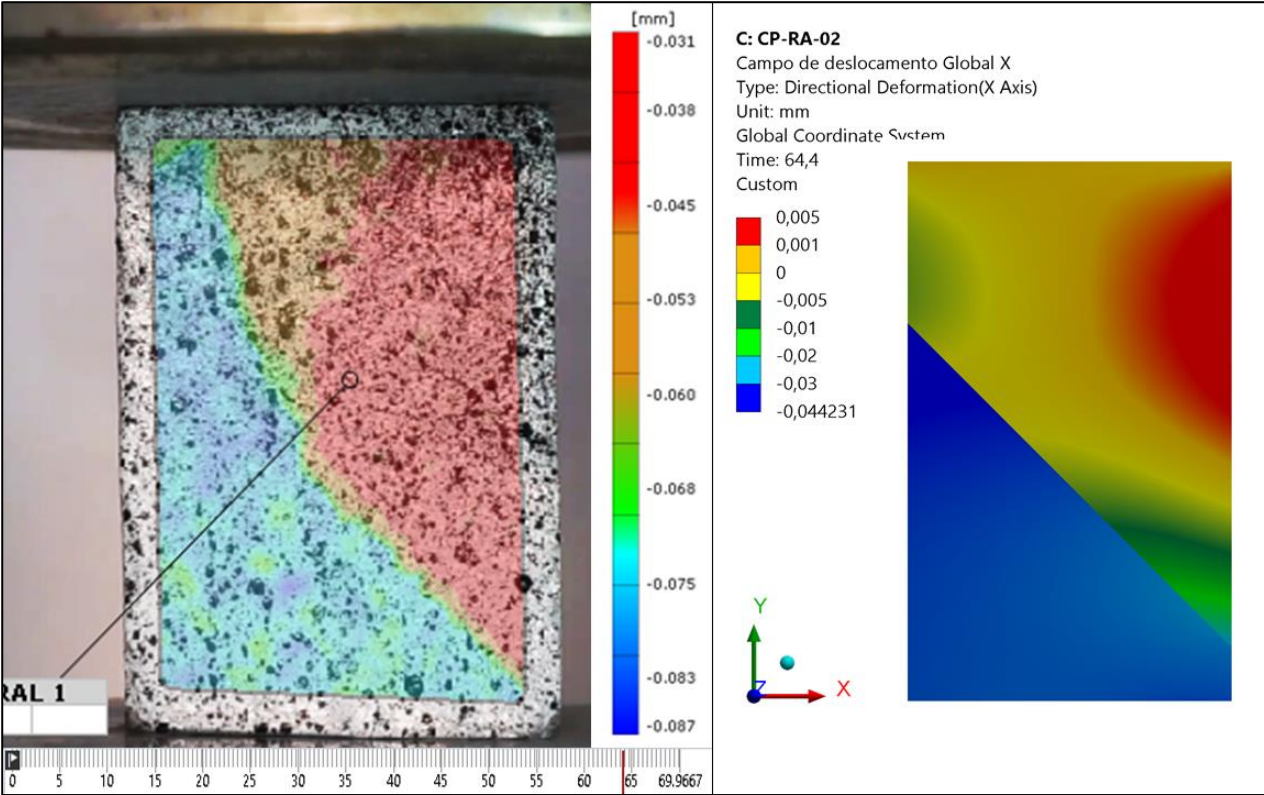
Fonte: O autor.

Figura 52 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=40s)



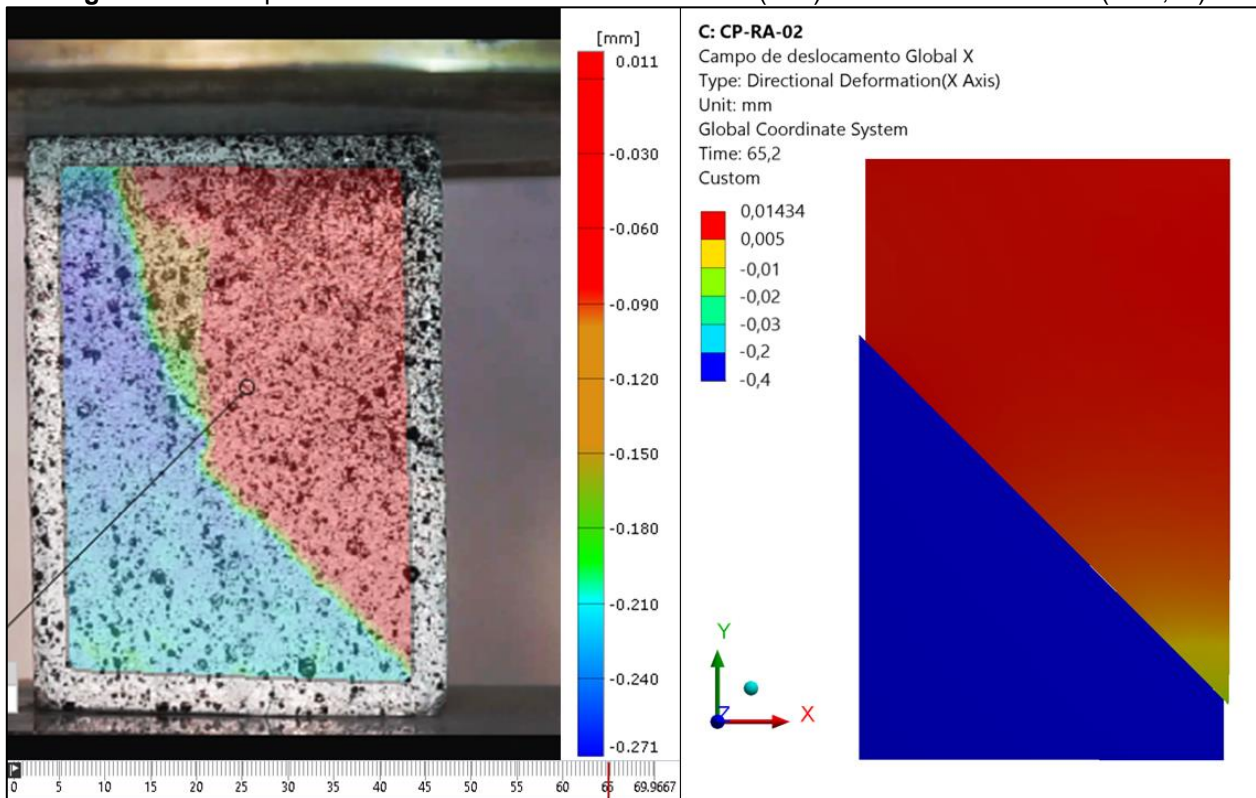
Fonte: O autor.

Figura 53 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=64,2s)



Fonte: O autor.

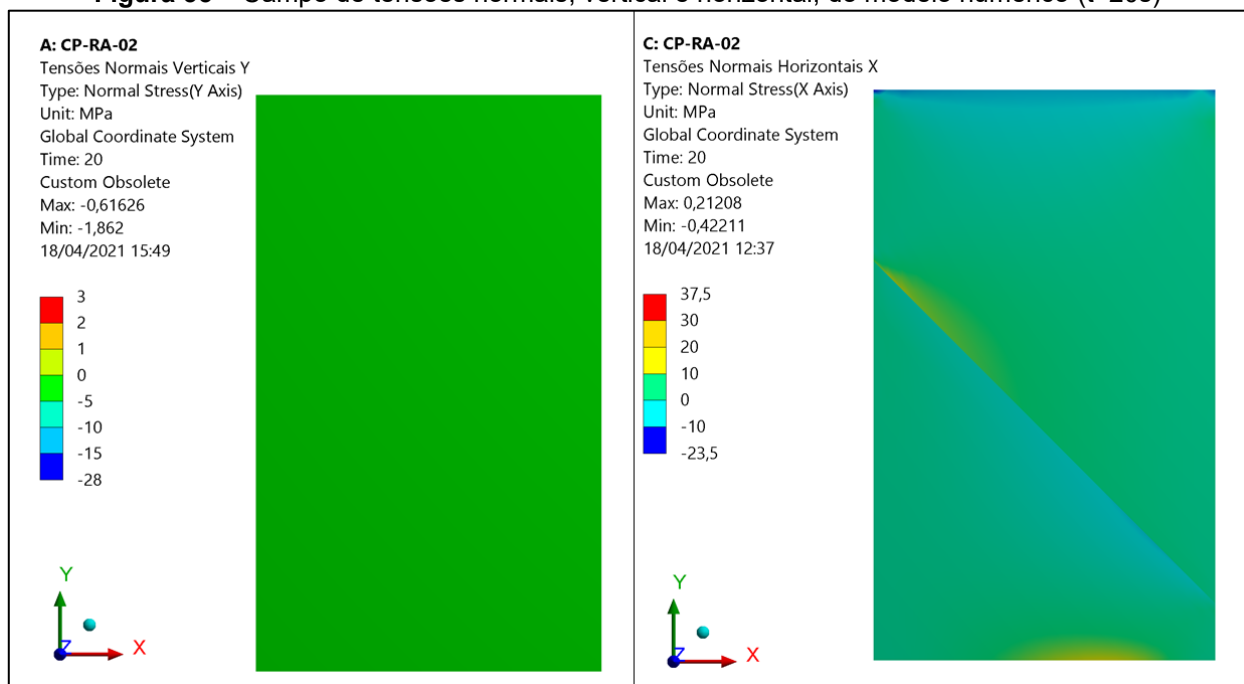
Figura 54 – Campo de deslocamento horizontal do ensaio (CID) e do modelo numérico (t=65,1s)



Fonte: O autor.

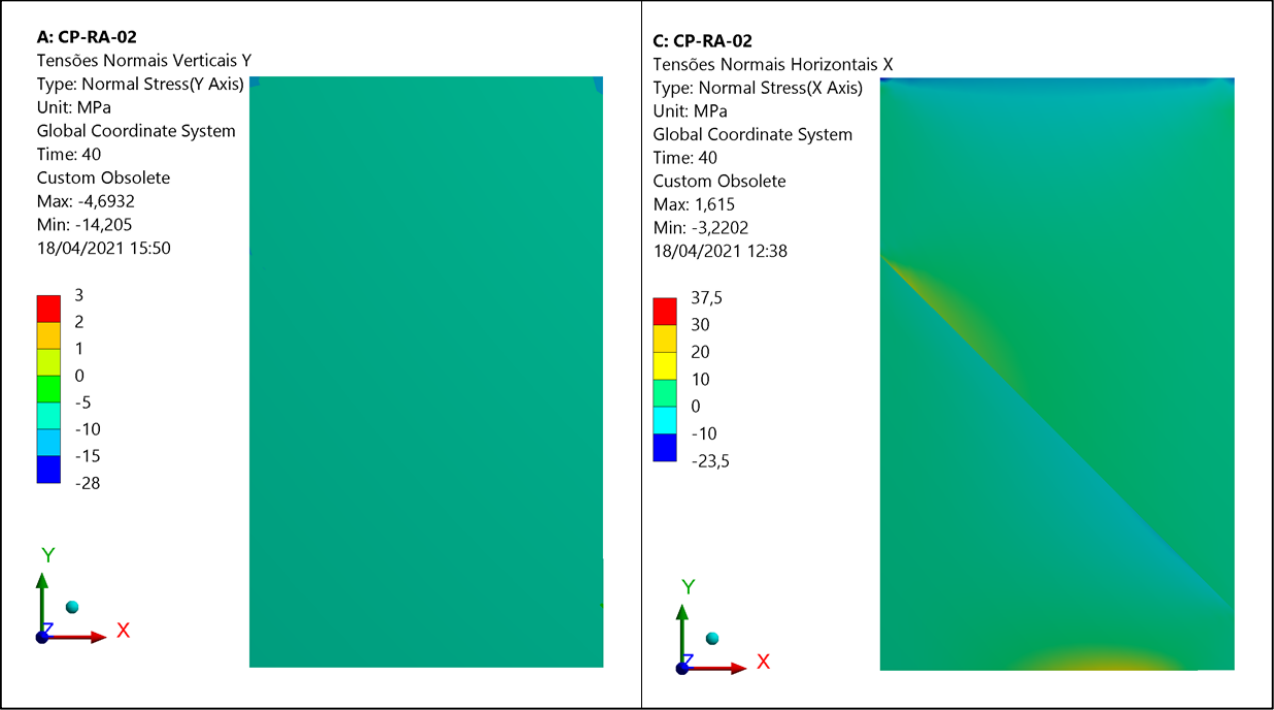
Nas Figura 55 até a Figura 58 são apresentados os campos de tensões normais, vertical (Y) e horizontal (X), do modelo numérico.

Figura 55 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=20s)



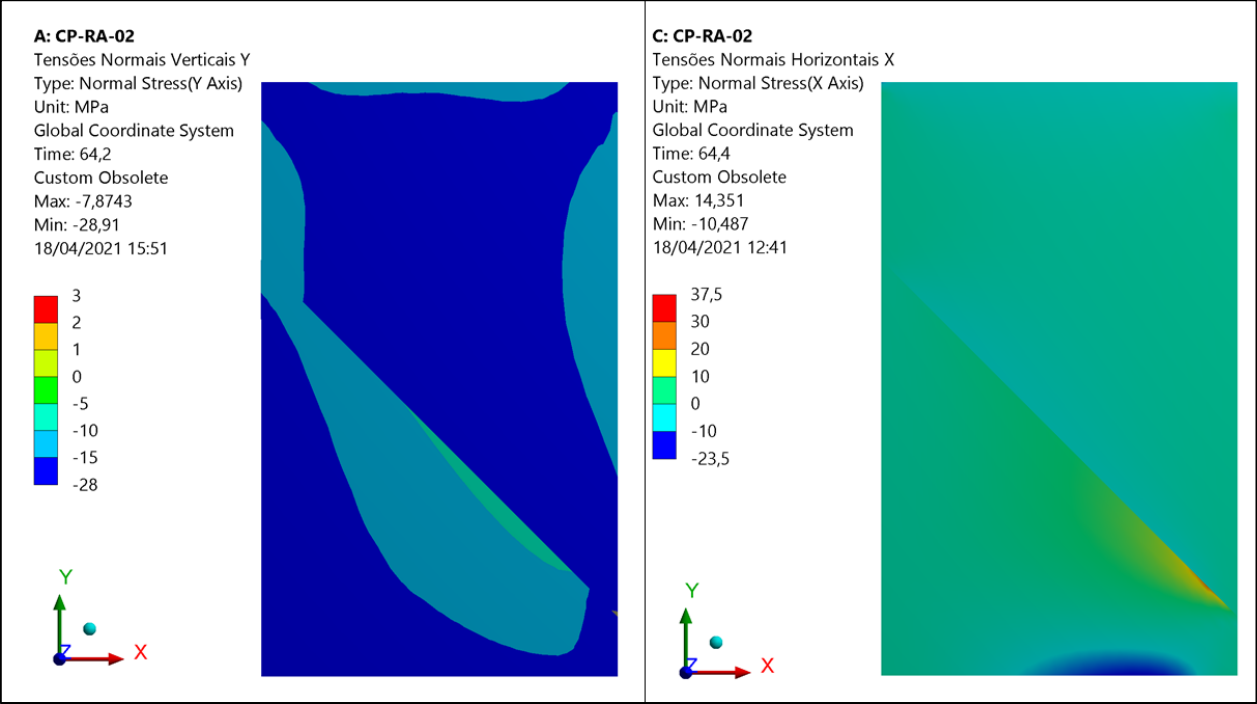
Fonte: O autor.

Figura 56 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=40s)

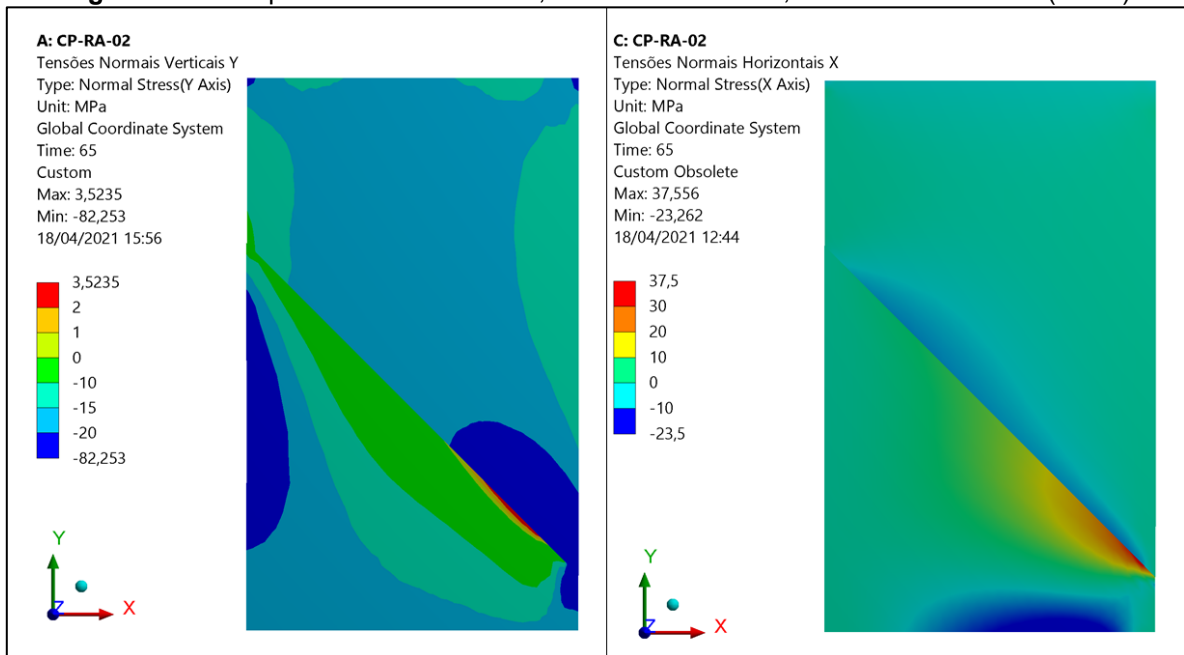


Fonte: O autor.

Figura 57 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=64,2s)

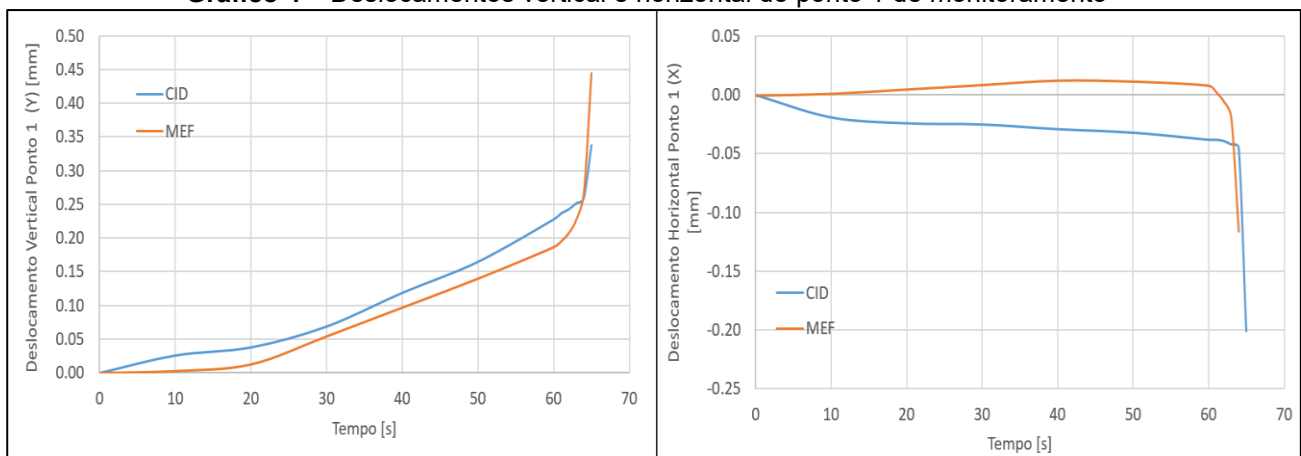


Fonte: O autor.

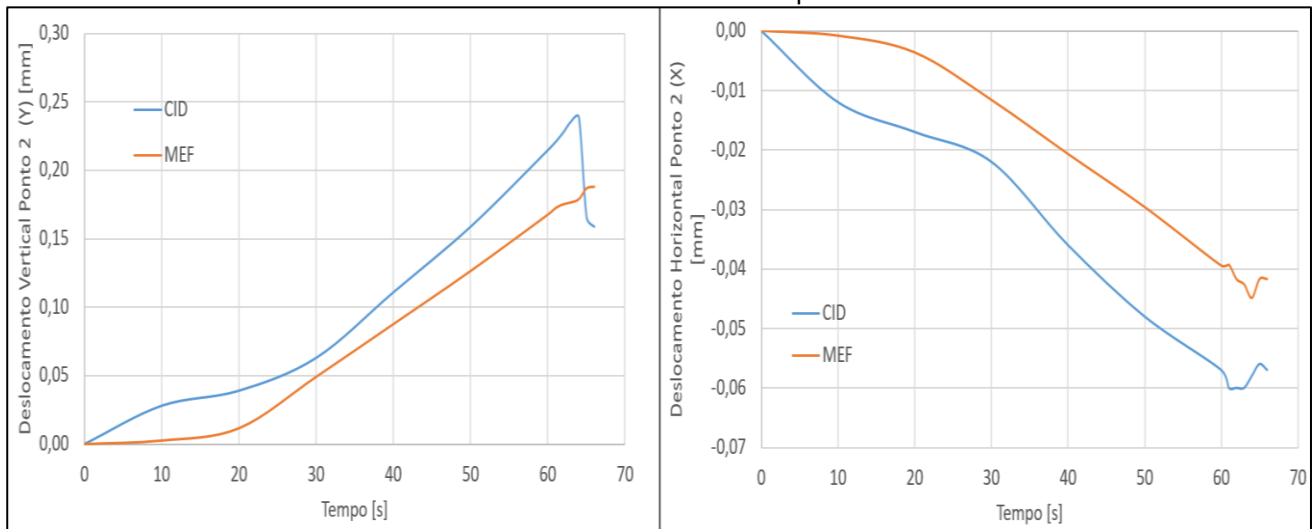
Figura 58 – Campo de tensões normais, vertical e horizontal, do modelo numérico (t=65s)

Fonte: O autor.

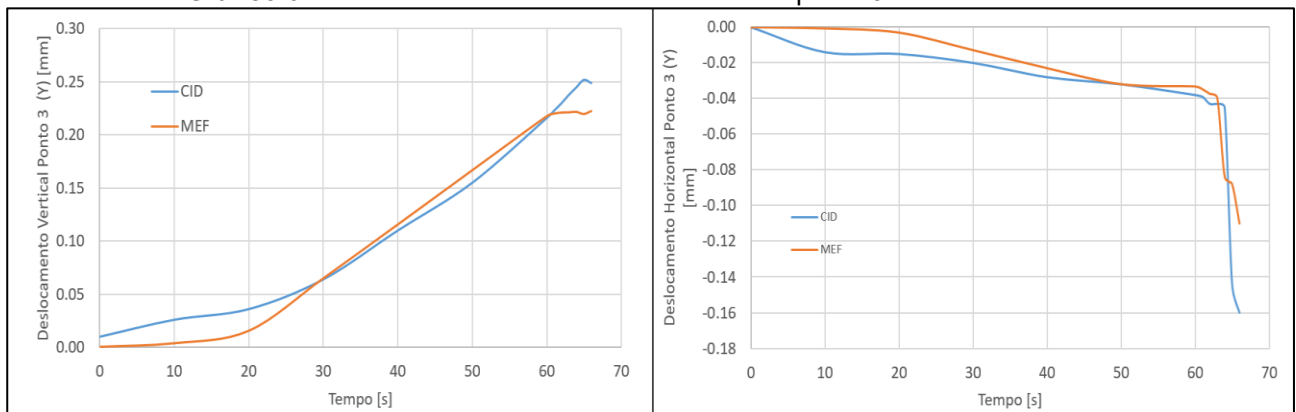
Realizou-se a análise dos pontos de monitoramento do ensaio experimental e, comparou-se com resultados dos mesmos pontos do modelo numérico. As ilustrações gráficas dos pontos de monitoramento, CID e MEF, são apresentados nos Gráfico 4 até o Gráfico 6.

Gráfico 4 – Deslocamentos vertical e horizontal do ponto 1 de monitoramento

Fonte: O autor.

Gráfico 5 – Deslocamentos vertical e horizontal do ponto 2 de monitoramento

Fonte: O autor.

Gráfico 6 – Deslocamentos vertical e horizontal do ponto 3 de monitoramento

Fonte: O autor.

Realizou-se a análise da diferença percentual acumulada dos resultados CID e MEF por meio da Média Percentual Absoluta do Erro (MAPE - *Mean Absolute Percentage Error*). Na Tabela 7 são apresentados os valores MAPE de cada ponto de monitoramento.

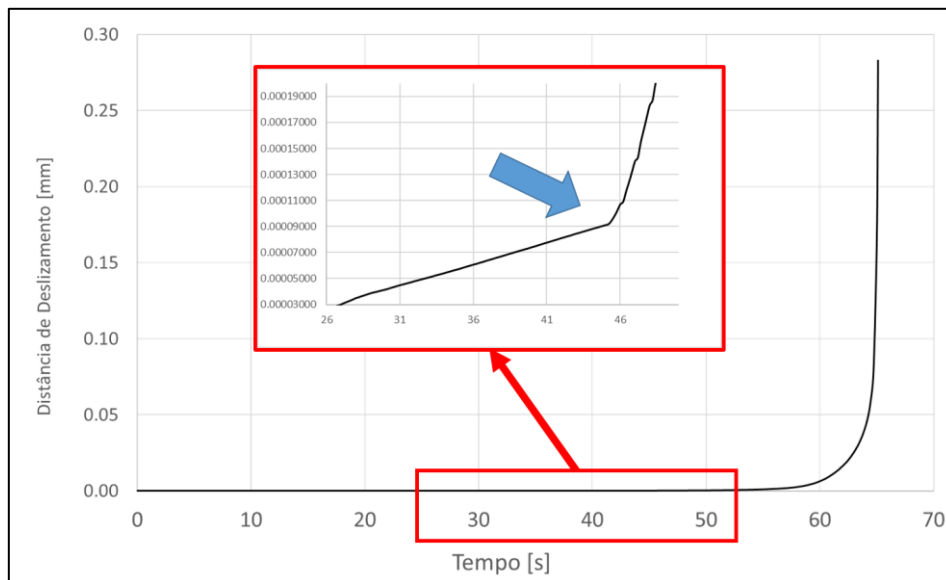
Tabela 7 - Erro MAPE dos pontos de monitoramento

Ponto monitorado	1		2		3	
Deslocamento	x	y	x	y	x	y
Erro MAPE	-	11.77	36.59	19.5	5.94	3.06

7.2.1. Comportamento da Interface de Contato (Zona Coesiva – Lei Bilinear)

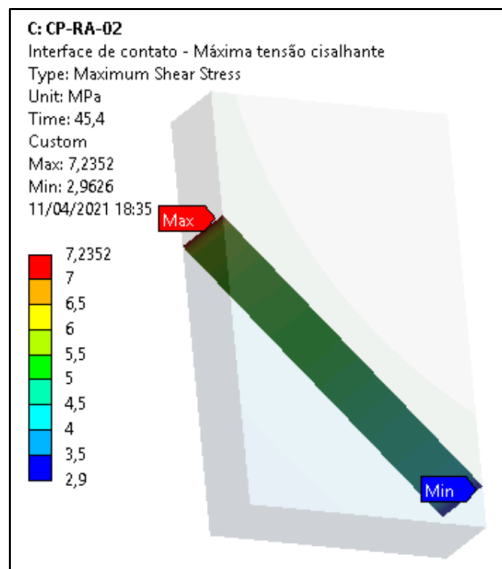
Conforme relatado no final do Item 7.1, comparando os resultados experimentais CID e o modelo numérico Elástico Linear no tempo $t=64,2s$, conclui-se que o corpo de prova inicia um comportamento não linear muito antes do momento da ruptura. Calibrando o modelo numérico com as propriedades MZC apresentadas na Tabela 6, pode-se notar no Gráfico 7 e na Figura 59, que o comportamento não linear no contato inicia no mesmo instante que a tensão máxima cisalhante na interface atinge o valor máximo cisalhante da Lei Bilinear de 7,15 MPa ($t=45,4s$).

Gráfico 7 – Deslizamento da interface de contato e detalhe no momento em que inicia o comportamento não linear



Fonte: O autor.

Figura 59 – Campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato ($t=45,4s$)

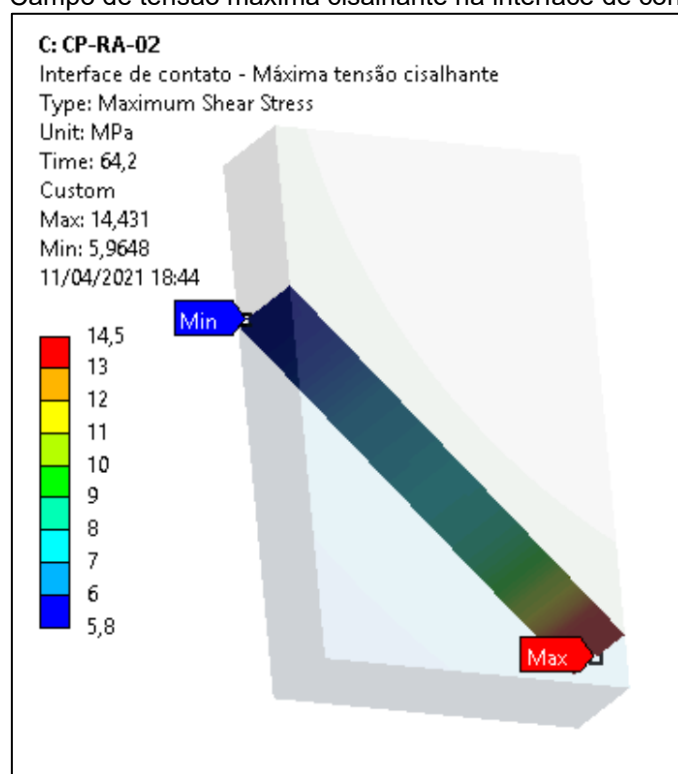


Fonte: O autor.

Dessa forma, a partir do tempo $t=45,4s$, iniciou-se o processo de danificação dos elementos de contato. O rompimento total do contato ocorre no tempo $t=64,2s$, quando a maior parte dos elementos de contato alcançam o deslocamento máximo previsto na Lei Bilinear de 0,2 mm.

Analisando o campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato, observa-se que a região que apresenta o maior valor se desloca da região superior à esquerda ($t=45,4s$) até a região inferior à direita ($t=64,2s$). No momento da ruptura, a interface de contato apresenta uma tensão máxima cisalhante de 14,5 MPa, conforme a Figura 60. Isso ocorre porque, com o início do descolamento da interface de contato, a área de distribuição de tensão diminui. Dessa forma, a tensão cisalhante aumenta na mesma velocidade que ocorre o descolamento do contato, até ocorrer a ruptura total.

Figura 60 – Campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato ($t=64,2s$)



Fonte: O autor.

7.2.2. Determinação dos Parâmetros da Zona Coesiva

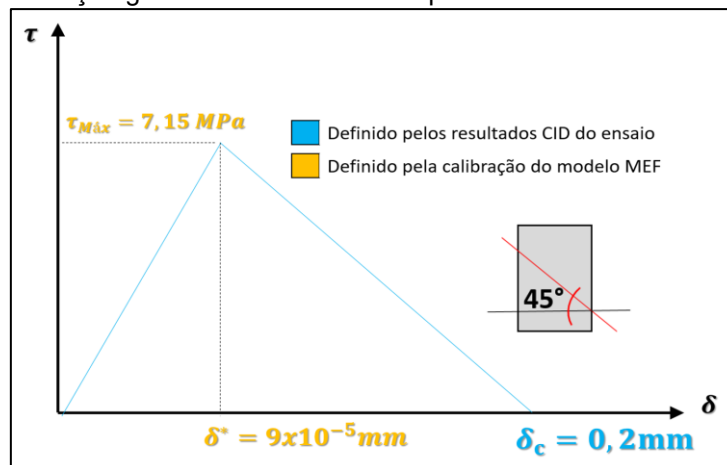
De acordo com Alfano e Crisfield (2001), a lei bilinear é definida por três parâmetros: Tensão máxima, deslocamento crítico e a taxa de carregamento e descarregamento. Este último é obtido por meio da relação entre o deslocamento que inicia a danificação e o deslocamento crítico. Analisando o Gráfico 7, é possível observar que a danificação inicia quando o elemento de contato atinge a tensão máxima cisalhante $\tau_{max} = 7,15 \text{ MPa}$ e deslocamento $\delta^* = 9 \times 10^{-5} \text{ mm}$. Assim, os parâmetros da lei Bilinear que simula o comportamento da interface coesiva rocha-argamassa do ensaio CP-RA-02 (Com ângulo de inclinação da interface de contato de 45°) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros da Lei Bilinear

$\tau_{max} [\text{Mpa}]$	7,15
$\delta_c [\text{mm}]$	0,2
δ^* / δ_c	0,00045

A ilustração gráfica da lei Bilinear completa é apresentada na Figura 61.

Figura 61 – Ilustração gráfica da lei bilinear completa com dados do método CID e MEF



Fonte: O autor.

Conforme relatado por Krieger (2014), quando um elemento finito começa a se danificar, a área abaixo da função da lei de separação de tração contabiliza o trabalho mecânico necessário para separar o elemento. Dessa forma, a área abaixo da curva é equivalente ao G_c (taxa crítica de liberação de energia de deformação da mecânica da fratura elástica linear). Utilizando os parâmetros da lei Bilinear, G_c pode ser estimado utilizando a Eq.(18).

$$G_c = \frac{1}{2} \delta_c \sigma_{max}. \quad (18)$$

Assim, o parâmetro G_c é igual a **0,71 [N/mm]**.

8. CONCLUSÕES

O comportamento cisalhante da interface do concreto assentado em superfície rochosa é um fator importante que afeta a resistência e a estabilidade de estruturas críticas, como por exemplo: pontes, barragens e túneis.

A obtenção de parâmetros que possam definir matematicamente o comportamento não linear desse tipo de contato é importante para se calibrar modelos numéricos capazes de simular a falha estrutural pelo rompimento de forças coesivas. Nesse contexto, o monitoramento de ensaios experimentais por meio do método CID permite a obtenção de dados qualitativos e quantitativos de todo o domínio do ensaio.

Neste trabalho, a aplicação do método CID apresentou diversos desafios, como por exemplo, a texturização granular dos corpos de prova prismáticos. Devido ao tamanho do corpo de prova e a câmera fotográfica digital disponível para a captura das imagens, decidiu-se realizar a texturização utilizando tinta spray. Aplicou-se a técnica mantendo o botão do spray levemente apertado, criando um efeito de borrifar. Inicialmente, ajustou-se a pressão do botão em uma folha em branco até atingir a textura granulométrica desejada. Em seguida, mantendo o spray apertado constantemente, iniciou-se a texturização dos corpos de prova prismáticos de forma ininterrupta. O segundo desafio está relacionado com a velocidade de captura da imagem. Para se registrar o fenômeno de deslocamento da interface de contato, foi necessário realizar o registro de vídeo do ensaio experimental. Essa decisão impactou diretamente na fase de processamento CID. Utilizando um computador de 56 GB de memória RAM e processador Intel i5 3.50 GHz, o tempo de processamento dos ensaios realizados foi 40 a 60 minutos.

Devido à dificuldade de simular precisamente as condições de restrição de movimento do ensaio experimental no modelo numérico, além das simplificações numéricas adotadas como isotropia e homogeneidade dos materiais, optou-se em realizar o monitoramento de pontos próximos da região central dos corpos de prova, incluindo a interface de contato rocha-argamassa.

Após a realização do ensaio e o processamento das imagens, realizou-se a análise elástica linear do modelo numérico para avaliar o comportamento da interface de contato no tempo $t=64,2s$ (momento de ruptura do ensaio experimental). Os resultados apresentaram um deslizamento médio e uma tensão máxima cisalhante na interface de contato de $1,53e-5mm$ e $11,3 MPa$, respectivamente.

Pelo método CID, alinhando as coordenadas de referência no sentido da interface de contato, constatou-se que a interface apresentou um deslizamento de

0,206 mm, milésimos de segundos antes da ruptura. Dessa forma, concluiu-se que, durante o ensaio de compressão axial, a interface de contato do corpo de prova não apresentou um comportamento elástico linear até o momento da ruptura ($t=64,233s$). O processo de danificação dessa interface iniciou segundos antes ao atingir a tensão cisalhante máxima, que deve ser inferior aos 11,3 Mpa.

Em relação ao modelo numérico não linear de contato, após avaliar todos métodos de zona coesiva disponíveis na biblioteca de materiais da *Ansys*, optou-se pela utilização da Lei de Descolamento baseado na Distância de separação. Esse método exige menos parâmetros de calibração e permite a configuração para o Modo I, Modo II ou o modo misto de fraturamento.

Em seguida, realizou-se uma análise paramétrica, variando a tensão máxima de cisalhamento dos elementos de ZC de contato para calibrar o modelo numérico considerando o tempo exato de ruptura do ensaio como um dos requisitos para a validação da simulação.

Utilizando os parâmetros da ZC apresentados na Figura 61, o modelo numérico iniciou o processo de danificação dos elementos de contato no tempo $t=45,4s$, quando atingiu a tensão máxima cisalhante prevista na lei bilinear (7,15Mpa). O rompimento total do contato ocorreu no tempo $t=64,2s$, quando a maior parte dos elementos de contato alcançam o deslocamento máximo previsto de 0,2 mm.

Analizando o campo de tensão máxima cisalhante na interface de contato, observou-se que a região que apresenta o maior valor transla do lado superior à esquerda do corpo de prova ($t=45,4s$), para a região inferior à direita ($t=64,2s$), percorrendo toda a interface de contato durante esse período. No momento da ruptura, a região inferior do lado direito da interface de contato apresentou uma tensão máxima cisalhante de 14,5 MPa. Isso ocorre porque, com o início da ruptura da interface de contato, a área de distribuição de tensão diminui. Dessa forma, a tensão cisalhante aumenta na mesma velocidade que ocorre o descolamento do contato, até ocorrer a ruptura total, momento que a tensão máxima cisalhante tende a infinito e a simulação é interrompida.

Posteriormente, foram realizadas análises comparativas entre os resultados CID e MEF dos pontos de monitoramento, incluindo a análise de erro acumulado durante todo o ensaio utilizando o erro MAPE.

No geral, os maiores erros MAPE estão relacionados com o deslocamento horizontal dos pontos monitorados.

O erro MAPE do deslocamento horizontal do ponto 1 não foi tabelado devido à grande diferença entre os resultados CID e MEF. Uma explicação pode estar na localização do ponto de monitoramento. O ponto 1 está perto da superfície inferior do corpo de prova. Nessa região ocorre a elevação da plataforma da prensa para realizar o carregamento. O equipamento utilizado para realizar o ensaio possui um sistema analógico de acréscimo de carga, controlado pelo usuário. Dessa forma, variações de velocidade no acréscimo de carregamento podem ter causado variações bruscas no deslocamento da plataforma de carregamento e, conseqüentemente, diminuído a precisão dos resultados CID dessa região.

No geral, a diferença acumulada em todo ensaio é considerada satisfatória, principalmente na região da interface de contato onde o erro MAPE do deslocamento horizontal foi de 5.94% e o vertical, 3.06%.

Finalmente, com modelo considerado calibrado, definiu-se a Lei de Zona Coesiva Bilinear para o caso particular de uma interface de contato de 45° entre a rocha e a argamassa ensaiada em laboratório.

9. REFERÊNCIAS

ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. 2003. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/AreasdeAtuacao/geracao/Manuais%20para%20Estudos%20e%20Projetos%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Energia/Crit%C3%A9rios%20de%20Projetos.pdf>>. Acessado em: 20 fev. 2021.

ALMEIDA, G. **Image Processing for Displacement Measurements**. Tese de Doutorado. FCT-UNL, 2014. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/14595/1/Almeida_2014.pdf>. Acessado em: 15 set. 2020.

HILD, François and ROUX Stéphane. **CORRELI-Q4: A Software for “Finite-element” Displacement Field Measurements by Digital Image Correlation**. Internal report no. 269. Université Paris. 2008.

INGLIS, C.E. **Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners**. **Transactions of the Institute of Naval Architects (British)**. vol. LX. 1993.

PETERS, W. H.; RANSON, W. F. **Digital imaging techniques in experimental stress analysis**. University of South Carolina Department of Mechanical. Optical Engineering. Vol. 21 No. 3. 1982.

CHU, T. C.; RANSON, W. F.; SUTTON, M. A. e PETERS W. H. **Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics**. Experimental Mechanics. Vol. 21, No. 3. 1985.

KARAMI A, STEAD D. **Asperity Degradation And Damage In The Direct Shear Test: A Hybrid Fem/Dem Approach**. Rock Mech Rock Eng 41. 2008.

JOHNSTONE W; LAM T.S.K. **Frictional characteristics of planar concrete–rock interfaces under constant normal stiffness condition**. 4th Australia–New Zealand conference on geomechanics, Perth, Australia. 1984.

BAHAADDINI, M.; SHARROCK, G.; HEBBLEWHITE, B.K. **Numerical Direct Shear Tests To Model The Shear Behaviour Of Rock Joints**. Comput Geotech 51. 2013.

TIAN, H. M.; CHEN, W. Z.; YANG, D. S.; YANG, J. P. **Experimental and Numerical Analysis of the Shear Behaviour of Cemented Concrete–Rock Joints**. Rock Mech Rock Eng. Springer. 2014.

HONG, Z.; Ean, T.; Chongmin, S.; Tao, D.; Gao, L; Hongjun. L. **Experimental and Numerical Study of the Dependency of Interface Fracture in Concrete-Rock Specimens on Mode Mixity**. Engineering Fracture Mechanics. 2014.

WEI, D.; ZHIMIN W.; XIANG; M. Z.; NA, W.; KASTIUKAS, G. **An experimental study on crack propagation at rock-concrete interface using digital image correlation technique**. Engineering Fracture Mechanics. Elsevier. 2016.

IRWIN, G. R., **Fracture Dynamics, Fracturing of Metals**, American Society for Metals. Cleveland. 1948.

LÓPEZ, J. F; Marante, M. E; Picón, R. **Fracture and Damage Mechanics for Structural Engineering of Frames: State of the Art Industrial Applications**. IGI global. 2015.

KRUEGER, R. **Virtual Crack Closure Technique: History, Approach, and Applications Applied Mechanics Reviews**. Vol. 57. 2004

TRAN, H. T.; SHIRANGI, M. H.; PANG, X.; VOLINSKY, A. A. **Temperature, Moisture and Mode-Mixity Effects on Copper Leadframe/EMC Interfacial Fracture Toughness**. International Journal of Fracture. vol. 185. 2013.

RICE, JR; Sih, GC. **Plane problems of cracks in dissimilar media**. Journal of Applied Mechanics, 32(2), 418. 1968.

WILLIAMS, M. L. **The Stresses Around a Fault or Crack in Dissimilar Media**. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 49, No. 2, 1959.

DOWD, N. P.; SHIH, C. F.; STOUT, M. G. **Test Geometries For measuring Interfacial Fracture Toughness**. International Journal of Solids and Structures. Vol. 29. 1992.

AGRAWAL, A.; KARLSSON, A. M. **Obtaining Mode Mixity For a Bimaterial Interface Crack Using The Virtual Crack Closure Technique**. International Journal of Fracture. Vol. 141. 2006.

HUTCHINSON, J.; SUO, Z. **Mixed Mode Cracking in Layered Materials**. Advances in Applied Mechanics. Vol. 29. 1992.

MATOS, P. P. L.; MACMEEKING, R. M.; CHARALAMBIDES, P. G.; DRORY, M. D. **A method for calculating stress intensities in bimaterial fracture**. International Journal of Fracture. Vol. 40. 1989.

ALFANO, G.; CRISFIELD, M. **Finite Element Interface Models for The Delamination Analysis of Laminated Composites: Mechanical and Computational Issues**. International journal for numerical methods in engineering. Vol. 50. 2001.

KRIEGER, W. E. R. **Cohesive Zone Modeling For Predicting Interfacial Delamination in Microelectronic Packaging**. Thesis. Georgia Institute of Technology. 2014.

SILVA, Angelo Q. N. **Correlação de Imagens Digitais em Ensaios de Compressão Diametral em Rochas**. Tese de doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/30275/1/tese%20angelo%202019.pdf>. Acessado em: 19 abr. 2021.

SUTTON, Michael, A, ORTEU, Jean J, SCHREIER, Hubert W. **Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications**. Springer Science. 2009.

McNEILLI, S. R.; PETERS, W. H. SUTTON, M. A. **Estimation of stress intensity factor by digital image correlation** Engineering Fracture Mechanics, vol. 28. 1987.

BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade de Lisboa. 2017. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/27685/1/Beleza_2017.pdf. Acessado em: 11 mai 2020.

JUNIOR, E. B. **Utilização do Método de Correlação de Imagens na Caracterização de Materiais Metálicos e Poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense. 2008.

BORNERT, M., BRÉMAND, F., DOUMALIN, P., DUPRÉ, J.-C., FAZZINI, M., GRÉDIAC, M., WATTRISSE, B. **Assessment of Digital Image Correlation Measurement Errors:**

Methodology and Results. Experimental Mechanics. 2008.

BING, Pan; HUI-MIN, Xie; BO-QIN, Xu; FU-LONG, Dai. **Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation.** Ed.17. Institute of Physics Publishing. 2006.

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications.** 3^a Edição. Taylor & Francis. 2005.