



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN**



**MÁRCIO EUCLIDES PACHECO FREITAS**

**APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM 2D PARA ANÁLISE DA  
DEFORMAÇÃO DE UM ESTEATITO EM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL**

**Ouro Preto – MG  
2025**

MÁRCIO EUCLIDES PACHECO FREITAS

APLICAÇÃO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM 2D PARA ANÁLISE DA  
DEFORMAÇÃO DE UM ESTEATITO EM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Silva Jaques.

Ouro Preto – MG  
2025

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F866a Freitas, Márcio Euclides Pacheco.

Aplicação da correlação digital de imagem 2D para análise da deformação de um esteatito em ensaio de compressão uniaxial. [manuscrito] / Márcio Euclides Pacheco Freitas. - 2025.

41 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Daniel Silva Jaques.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mecânica das rochas. 2. Rochas metamórficas - Esteatito. 3. Deformações (Mecânica). I. Jaques, Daniel Silva. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.121

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Márcio Euclides Pacheco Freitas**

### **Aplicação da correlação digital de imagem 2D para a análise da deformação de um esteatito em ensaio de compressão uniaxial**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 25 de Março de 2025

#### Membros da banca

Dr. Daniel Silva Jaques - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. José Margarida da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto  
Engenheiro Danilo José da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Daniel Silva Jaques, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Silva Jaques, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/03/2025, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0884866** e o código CRC **6D2EEA25**.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos neste longo caminho até aqui.

Aos meus pais (in memoriam) por toda criação, amor e tudo de melhor que foram e são em minha vida. Tenho certeza de que, lá de cima, estão muito felizes com essa etapa vencida.

Aos meus irmãos, por todo apoio, suporte e incentivo.

À Sophia, por todo amor, apoio e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Daniel Silva Jaques, pela orientação, tempo dedicado e todo o suporte ao longo deste trabalho.

À UFOP, à Escola de Minas e a todos os professores do DEMIN pelo excelente ensino público e de qualidade.

## RESUMO

A análise do comportamento mecânico de rochas é fundamental para diversas aplicações na engenharia, desde a caracterização geomecânica de maciços rochosos até a previsão de falhas em estruturas geotécnicas e industriais. Métodos tradicionais de medição de deformações, como extensômetros e transdutores de deslocamento, apresentam limitações na captura detalhada da distribuição das deformações superficiais. Neste contexto, a Correlação Digital de Imagens (CDI) surge como uma alternativa promissora para monitoramento não intrusivo de deslocamentos e deformações em materiais submetidos a esforços mecânicos. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação da técnica de CDI para a análise do comportamento mecânico do esteatito em ensaios de compressão uniaxial. A metodologia envolveu a coleta de blocos da rocha em estudo, preparação de corpos de prova, captação de imagens durante os ensaios de compressão uniaxial e processamento dessas imagens no software ZEISS inspect correlate, com o objetivo de mapear deformações e identificar regiões críticas de concentração de tensões. Os resultados obtidos demonstraram a eficácia da CDI na mensuração de deslocamentos e deformações superficiais, permitindo a geração de gráficos tensão-deformação e mapas de deformação. A análise revelou que as regiões de maior deformação observadas pela CDI corresponderam aos pontos que constituem a(s) superfície(s) de ruptura do corpo de prova, validando a precisão da técnica. Além disso, o estudo destacou o comportamento do esteatito sob carregamento cíclico, evidenciando sua capacidade de acumular deformações plásticas antes da ruptura. A integração entre a CDI e os métodos tradicionais de análise experimental permitiu a obtenção de dados mais detalhados, contribuindo para uma caracterização mecânica mais completa do material. Os resultados reforçam o potencial da CDI como ferramenta complementar em estudos de mecânica das rochas e engenharia de materiais, ampliando sua aplicabilidade na caracterização de propriedades geomecânicas e na previsão de rupturas em estruturas geotécnicas e industriais.

**Palavras-chave:** Esteatito, compressão uniaxial, correlação digital de imagens, deformação, mecânica das rochas.

## ABSTRACT

This study aims to address the challenge of accurately characterising the mechanical behaviour of steatite under uniaxial compression, a crucial aspect in both geomechanics and material engineering. The objective of this study was to evaluate the application of the Digital Image Correlation (DIC) technique in mapping deformations and identifying critical stress concentration regions in this type of rock. The methodology comprised the collection of rock blocks, the preparation of specimens, the capture of images during uniaxial compression tests, and the subsequent processing of these images using ZEISS Inspect Correlate software. The outcomes of this study demonstrated the efficacy of DIC in quantifying displacements and surface deformations, thereby facilitating the generation of stress-strain graphs and deformation maps. The analysis revealed that the regions with the highest deformation detected by DIC corresponded to the points forming the failure surface(s) of the specimen, validating the precision of the technique. Furthermore, the study highlighted the behaviour of steatite under cyclic loading, demonstrating its ability to accumulate plastic deformations before failure. The integration of DIC with traditional experimental analysis methods yielded more detailed data, thus contributing to a more comprehensive mechanical characterisation of the material. The findings reinforce the potential of DIC as a complementary tool in rock mechanics and material engineering studies, with applications ranging from geomechanical property characterisation to failure prediction in geotechnical and industrial structures.

**Keywords:** Soapstone; uniaxial compression; Digital Image Correlation; deformation; rock mechanics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelos de comportamento tensión-deformación;.....	12
Figura 2 – Curva generalizada tensão–deformação para rochas.....	13
Figura 3: Curva tensão-deformação.....	16
Figura 4 – Amostras preparadas.....	24
Figura 5 – Amostras com superfícies pintadas.....	24
Figura 6 – Arranjo experimental.....	26
Figura 7 – Criação do componente de superfície do CP.....	28
Figura 8 – Gráfico Tensão-Frames.....	32
Figura 9 – Gráfico Tensão-Deformação.....	34
Figura 10 - Registro das deformações lidas pelo <i>software</i> no último <i>frame</i> .....	36
Figura 11 - Registro do corpo de prova após a ruptura.....	37



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
2.1	Objetivo Geral .....	8
2.2	Objetivo específico .....	8
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>9</b>
3.1	Propriedades geomecânicas das rochas .....	9
3.1.1	Propriedades de resistência .....	10
3.1.2	Propriedades de deformabilidade .....	11
3.2	Ensaio de compressão uniaxial.....	14
3.3	Correlação digital de imagens.....	16
3.3.1	Fundamentos da correlação digital .....	16
3.3.2	Parâmetros que influenciam o método .....	18
3.3.3	Softwares de CDI.....	20
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
4.1	Seleção e coleta dos blocos de esteatito .....	22
4.2	Preparação das amostras .....	23
4.3	Montagem do arranjo experimental e execução dos ensaios .....	25
4.4	Processamento das imagens e dados dos ensaios .....	26
4.4.1	Determinação da região de interesse e escala .....	27
4.4.2	Alinhamento dos dados obtidos pela prensa com os dados capturados pelo Inspect Correlate .....	28
4.5	Construção do Gráfico Tensão-Deformação.....	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
5.1	Análise combinada das Figuras 8 e 9 .....	35
5.2	Correlação entre Deformações Observadas e o Local de Ruptura .....	36
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>38</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O estudo da mecânica das rochas é essencial para o avanço de diversas áreas da engenharia, especialmente na compreensão do comportamento mecânico do meio rochoso sob diferentes condições de carregamento. O esteatito, uma rocha metamórfica também conhecida como “pedra-sabão”, é amplamente utilizado na indústria e no artesanato, devido às suas propriedades térmicas, aos minerais constituintes e à sua estabilidade química. No entanto, para otimizar seu uso em aplicações específicas, torna-se necessária uma análise detalhada de suas constantes elásticas e de seu comportamento sob compressão.

A Correlação Digital de Imagem (CDI) é uma técnica não invasiva e de alta precisão para mensurar a deformação de materiais durante ensaios mecânicos. Seu uso crescente na mecânica das rochas e na resistência dos materiais deve-se à sua capacidade de fornecer dados significativos e detalhados sem a necessidade de contato direto com o corpo de prova, minimizando interferências externas nos resultados. No entanto, estudos específicos que avaliem sua aplicação no contexto do esteatito ainda são escassos.

Este trabalho justifica-se pela necessidade de ampliar a compreensão do comportamento do esteatito sob compressão uniaxial e pela importância de validar a técnica de correlação digital de imagem 2D como uma ferramenta eficaz para a mensuração das propriedades de deformação desse material. Os resultados obtidos podem contribuir tanto para a pesquisa acadêmica quanto para aplicações industriais, promovendo maior precisão nos processos de análise e controle de qualidade de materiais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

A pesquisa objeto deste trabalho de conclusão de curso tem por objetivo principal avaliar a aplicação da correlação digital de imagem 2D como técnica para mensurar a deformação de um esteatito em ensaios de resistência à compressão uniaxial.

### **2.2 Objetivo específico**

Determinar a curva tensão-deformação para o esteatito a partir de dados da aplicação de CDI e da força aplicada aos corpos de prova no teste (ensaio) à compressão uniaxial.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Segundo Lakatos e Marconi (2010), a referência bibliográfica é um elemento essencial de qualquer trabalho científico, pois permite identificar as fontes de informação utilizadas pelo autor. Dessa forma, o leitor pode verificar a validade das informações apresentadas no trabalho e aprofundar seus conhecimentos sobre o tema abordado.

Com isso, nessa seção serão apresentados os conceitos dos assuntos tratados no trabalho.

#### **3.1 Propriedades geomecânicas das rochas**

Os problemas de engenharia em mecânica das rochas envolvem a análise da capacidade do maciço rochoso de suportar as cargas aplicadas sem sofrer ruptura ou deformação excessiva. Essa capacidade é determinada pelas propriedades geomecânicas das rochas, sobretudo da matriz rochosa delimitada pelas descontinuidades do maciço. Na mecânica das rochas, segundo Hudson (2001), essas propriedades são fundamentais para o planejamento e a execução de obras de engenharia civil, mineração, petróleo e gás, entre outras. A compreensão dessas características é essencial para garantir a segurança e a estabilidade das estruturas.

De acordo com Jaeger, Cook e Zimmerman (2007), a relação entre as propriedades mecânicas da rocha e suas características estruturais é complexa e multifacetada. Cada característica individual contribui de maneira particular para o comportamento geral da rocha, e a importância de cada uma varia conforme as circunstâncias específicas. Nesse contexto, a atribuição de valores numéricos às propriedades mecânicas da rocha é crucial para diversos estudos e projetos. A obtenção desses valores ocorre, majoritariamente, por meio de ensaios laboratoriais realizados em amostras de rocha com dimensões da ordem de alguns centímetros.

Azevedo e Marques (2002) afirmam que os problemas de engenharia em mecânica das rochas envolvem duas questões básicas: a resistência ao colapso e os deslocamentos admissíveis. Ainda segundo esses autores, a resistência ao colapso refere-se à capacidade do maciço rochoso de suportar as tensões atuantes

sem sofrer ruptura. Essa questão é fundamental para a segurança de estruturas construídas em rocha, como fundações, barragens e túneis. Já os deslocamentos admissíveis dizem respeito às deformações máximas que o maciço rochoso pode suportar sem causar danos à estrutura. Essa questão é essencial para garantir a funcionalidade da estrutura, mesmo sob carregamentos elevados.

### **3.1.1 Propriedades de resistência**

“Quando uma rocha perde a capacidade de desempenhar seu papel diante de determinada solicitação, por exemplo, aquela resultante da implantação de uma obra de engenharia, diz-se que ela rompeu, ou seja, perdeu totalmente sua integridade” (AZEVEDO; MARQUES, 2002, p. 64).

Existem diversos tipos de ruptura em um maciço rochoso, cada um influenciado pelas propriedades mecânicas da rocha, como resistência à compressão, tração e cisalhamento, bem como pelas condições geológicas e pelas forças atuantes na região. Os principais tipos de ruptura são:

- Ruptura por Flexão: ocorre quando a rocha é submetida a forças que a fazem curvar-se ou dobrar-se até o ponto de ruptura. Esse tipo de ruptura é comum em materiais que são relativamente fortes em compressão, mas fracos em tração. A rocha pode se curvar e quebrar ao longo de uma superfície curva, especialmente em áreas onde há mudanças abruptas na direção da força aplicada.
- Ruptura por Tração: acontece quando a rocha é submetida a forças que a solicitam em direções opostas, tentando separar suas partes. Isso pode ocorrer em superfícies de ruptura onde a tensão é aplicada perpendicularmente à direção da falha. Geralmente, as rochas são mais fracas em tração do que em compressão, tornando esse tipo de ruptura comum em diversas situações geológicas e de engenharia.
- Ruptura por Cisalhamento: ocorre quando a rocha é submetida a forças que deslizam suas partes em direções opostas ao longo de uma superfície de falha. Esse fenômeno pode acontecer em zonas de fratura pré-existentes ou ao longo de planos de fraqueza da rocha, resultando frequentemente em falhas angulares ou superfícies de cisalhamento.

- Ruptura por Compressão: manifesta-se quando a rocha é submetida a forças que a pressionam em direção ao seu centro, tentando reduzir seu volume. Esse tipo de ruptura é comum em regiões geológicas onde forças tectônicas exercem pressão sobre as rochas, resultando em dobras, falhas e outras deformações compressivas.

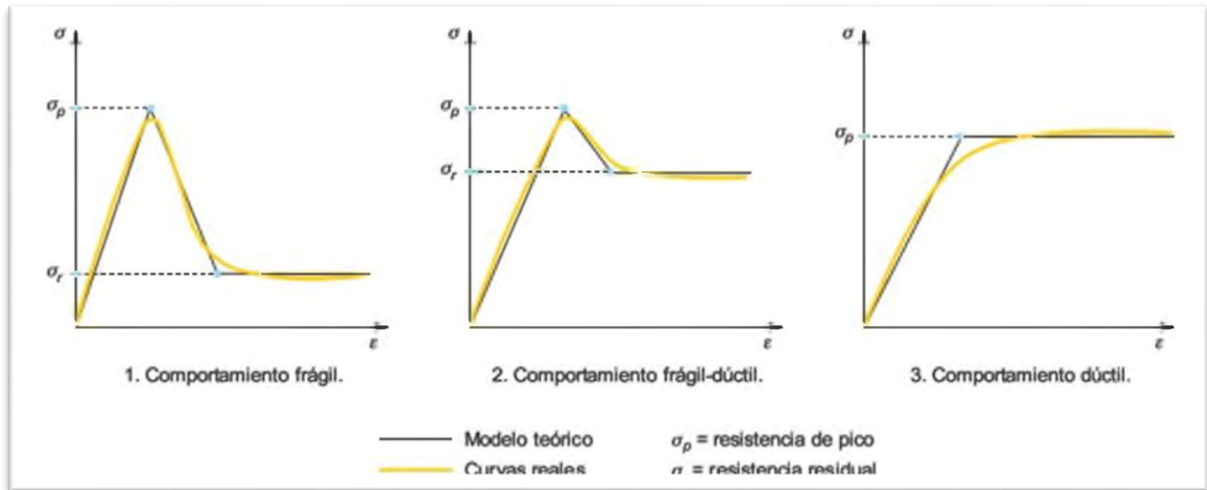
### **3.1.2 Propriedades de deformabilidade**

Vallejo et al. (2002) apontam que o comportamento tensão-deformação de um material rochoso é definido pela relação entre as tensões aplicadas e as deformações resultantes. Essa relação descreve como o material responde ao carregamento ao longo do tempo, indicando as mudanças em sua resistência conforme diferentes níveis de deformação são atingidos. Em outras palavras, permite avaliar a evolução das propriedades de deformabilidade da rocha à medida que a carga é aplicada, abrangendo desde seu comportamento antes da ruptura, no processo de fratura e sua resposta após a falha estrutural.

Ainda de acordo com os autores, a forma como uma rocha reage à aplicação de carga depende de sua resistência e capacidade de deformação. Quando a tensão aplicada ultrapassa a resistência máxima do material, diferentes respostas podem ocorrer:

- Materiais frágeis, como vidro e algumas rochas duras, apresentam ruptura abrupta, com pouca deformação plástica e uma perda quase instantânea da resistência (curva 1 da Figura 1);
- Materiais com comportamento frágil-dúctil, como descontinuidades rochosas ou solos argilosos, sofrem uma redução gradual da resistência após a deformação de pico, sem colapso imediato (curva 2 da Figura 1);
- Materiais dúcteis, como algumas formações salinas, podem continuar se deformando sem perder resistência, mantendo a capacidade de suportar cargas mesmo após grandes deformações. Esses materiais são mais maleáveis e possuem maior capacidade de redistribuir as tensões internamente (curva 3 da Figura 1).

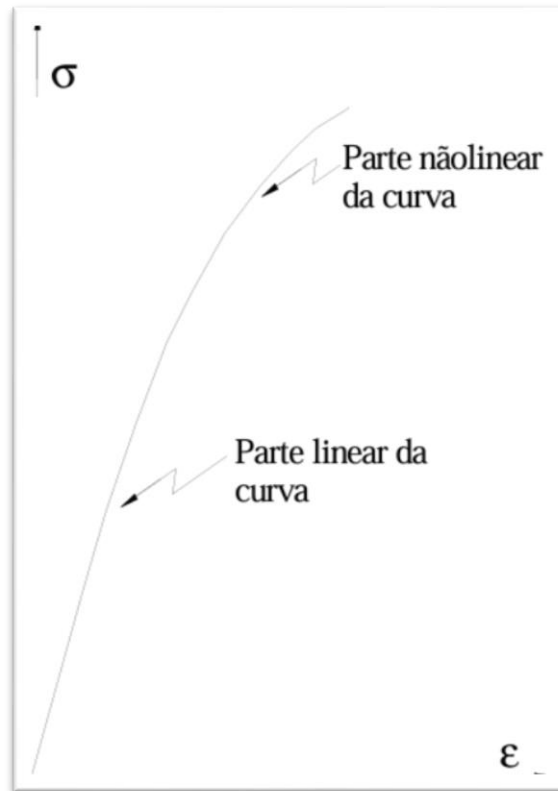
Figura 1 – Modelos de comportamento tensión-deformación;



Fonte: Vallejo (2002).

Panitz (2007) ressalta que os principais comportamentos tensão-deformação das rochas podem ser representados por uma curva que apresenta, inicialmente, uma região linear com maior inclinação. À medida que as tensões aumentam e a resistência máxima é alcançada, essa inclinação começa a diminuir, e a curva passa a apresentar um comportamento não linear (Figura 2).

Figura 2 – Curva generalizada tensão–deformação para rochas



Fonte: Farmer (1968).

Vallejo et al. (2002) explicam que, antes de atingir a resistência de pico, a curva tensão-deformação das rochas segue um padrão linear ou elástico, indicando que a deformação ocorre de maneira proporcional à carga aplicada. Nesse estágio, conhecido como regime elástico, o material ainda não sofreu danos permanentes, e sua resposta mecânica pode ser descrita pela seguinte relação.

$$E = \frac{\sigma_{axial}}{e_{axial}} \quad (1)$$

Em que:

E: constante de proporcionalidade, conhecida como módulo de elasticidade ou chamada de módulo de Young (Pa);

$\sigma_{axial}$ : tensão axial aplicada (MPa);

$e_{axial}$ : deformação na mesma direção da força aplicada.



Ainda segundo o autor, há outra constante que define o comportamento elástico da rocha juntamente com o valor de E: o coeficiente de Poisson.

$$\nu = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ax}} \quad (2)$$

Em que:

$\nu$ : coeficiente de Poisson;

$\varepsilon_i$ : deformação transversal.

### 3.2 Ensaio de compressão uniaxial

Para determinar as tensões suportadas por um maciço rochoso, são realizados diferentes ensaios laboratoriais específicos, seguindo métodos padronizados. Cada tipo de ensaio contribui para a compreensão do comportamento das rochas sob diferentes condições de carga.

Segundo Fiori (2015), o ensaio mais utilizado na mecânica das rochas para a determinação da resistência e deformabilidade é o ensaio de compressão uniaxial. Trata-se de um ensaio destrutivo, no qual o corpo de prova (CP) é danificado durante o processo. Sua execução é relativamente simples: o corpo de prova é posicionado entre placas de carga e submetida a um carregamento axial crescente, aplicado de forma contínua e uniforme até a ruptura. No instante da falha, a resistência à compressão uniaxial do material corresponde à tensão aplicada pela máquina.

Durante a execução do ensaio, são registrados o deslocamento e a deformação do corpo de prova à medida que a carga aumenta. Para essa medição, é amplamente difundido o uso de transdutores de deslocamento linear e extensômetros, conhecidos, respectivamente, como LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e *Strain Gauge*. Contudo, apesar de entregarem dados medidos com acurácia, como afirma Jaques (2019), esses dispositivos de

instrumentação requerem elevado investimento inicial, são muito sensíveis (frágeis) e demandam demasiado tempo na preparação dos ensaios.

Azevedo e Marques (2002) indicaram que fatores intrínsecos e extrínsecos podem influenciar a resistência à compressão uniaxial da rocha. Entre os fatores intrínsecos, destacam-se a mineralogia, as propriedades físicas e a textura. Já os fatores extrínsecos incluem a geometria do corpo de prova (CP), a velocidade de carregamento e a rigidez das máquinas de ensaio.

A resistência à compressão uniaxial corresponde à carga de ruptura da amostra, calculada por:

$$\sigma_c = q_u = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Em que:

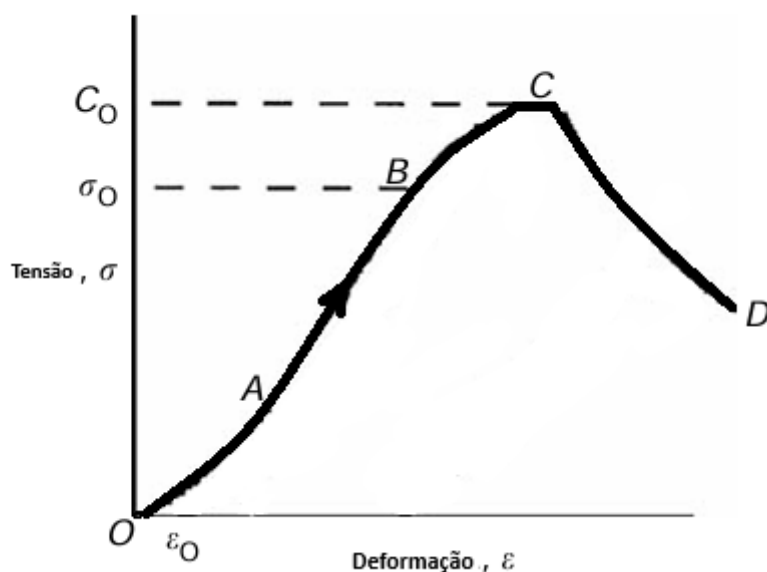
$\sigma_c = q_u$  : resistência à compressão uniaxial máxima ou última (MPa);

P: carga de ruptura, normalmente em quilogramas-força ou quilonewtons;

A: área inicial da face da amostra em contato com a placa de carregamento (mm<sup>2</sup>).

A partir do ensaio de compressão simples (uniaxial), além de calcular a resistência à compressão uniaxial, também é possível gerar uma curva tensão-deformação, a qual permite avaliar o comportamento deformacional da rocha sob carregamento compressivo. Em geral, os sólidos tendem a apresentar estágios distintos de comportamento tensão-deformação em função do carregamento ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 3. Por meio da curva tensão-deformação e dependendo da instrumentação utilizada durante o ensaio, é possível obter as constantes elásticas do material, como o Módulo de Young (E) e o Módulo de Poisson ( $\nu$ ).

Figura 3: Curva tensão-deformação



Fonte: JAEGER et al., 2007 (adaptado).

Jaeger et al. (2007) definem que, em todo o segmento OB, o comportamento do CP é praticamente elástico. Portanto, qualquer carga ou descarga sobre a amostra não produzirá um efeito irreversível na estrutura ou nas propriedades da rocha. No ponto B, inicia-se o comportamento dúctil, que vai até o ponto C, o qual representa o ponto de tensão máxima que a rocha está suportando. Nessa região BC, as mudanças provocadas são irreversíveis. Já o segmento CD, que possui uma inclinação negativa e representa o comportamento frágil, é onde a carga suportada pela rocha diminui à medida que a deformação aumenta.

### 3.3 Correlação digital de imagens

#### 3.3.1 Fundamentos da correlação digital

De acordo com Moreira (2015), a obtenção de propriedades ou características de processos, por meio de fotografias, tem crescido significativamente com o avanço das técnicas de correlação digital de imagens (CDI). Surgida nos anos 1980, trata-se de uma técnica óptica não destrutiva, que

exige pouca ou, em alguns casos, nenhuma preparação da superfície do material a ser testado. Além disso, o equipamento e a configuração necessários são relativamente simples. A CDI baseia-se na comparação de imagens digitais capturadas antes e após a deformação do corpo testado, para determinar os deslocamentos e a deformação a partir das alterações ocorridas na superfície. Para isso, a partir da seleção de um ponto na imagem inicial, busca-se identificar sua nova posição na imagem deformada. Não se considera apenas o ponto específico, mas também um conjunto de pixels em sua vizinhança. A distribuição de intensidades nessa região é comparada com todas as possíveis regiões na imagem final, visando encontrar a correspondência ideal.

Ainda de acordo com Moreira (2015), para garantir que cada região do material seja única, aplica-se um padrão aleatório na superfície do corpo em estudo, que será filmada durante a compressão. A partir da diferença entre as posições de um ponto nas imagens inicial e final, determina-se o deslocamento ocorrido. Ao estender essa análise para múltiplos pontos na superfície deformada, é possível estimar o campo de deslocamentos presente. Contudo, o método ainda enfrenta algumas dificuldades, especialmente no controle de parâmetros internos e externos que influenciam diretamente o processo. Isso pode resultar de concentração de tensões, deformações não homogêneas e falhas na captura de imagens ou nos ajustes da câmera utilizada. Apesar desses desafios, pesquisas contínuas têm aprimorado a precisão das medições e minimizado os problemas inerentes ao uso da técnica ao longo dos anos.

Segundo Schreier (2009), é por meio da utilização de padrões aleatórios e da comparação de sub-regiões em toda a imagem que são obtidas as medidas do campo completo de análise. Em outras palavras, a partir de padrões aleatórios, que contrastam com a iluminação de fundo e são pintados no corpo de prova, a CDI registra, ao longo do tempo, como está sendo a movimentação desses padrões, antes e depois do carregamento, para, assim, identificar a deformação do corpo. Além de padrões aleatórios, esse registro também pode ser feito em outros tipos de padrões, como linhas, grades ou pontos.

Para Beleza (2007), a importância de um padrão estocástico está em garantir que cada zona da superfície do CP a ser analisada seja única, garantindo o processo de correspondência. Esse processo tem como objetivo analisar um único

ponto de uma imagem para a outra. Portanto, se não existir um padrão aleatório, não será possível garantir a particularidade de um único ponto, o que pode levar o algoritmo a analisar mais de uma correspondência para o ponto encontrado, resultando assim em um fenômeno de descorrelação.

### **3.3.2 Parâmetros que influenciam o método**

A partir dos conceitos apresentados, pode-se perceber que o método de correlação digital por imagens é bastante sensível e pode ser influenciado por diversos fatores. Beleza (2007) dividiu os parâmetros influenciadores em internos e externos.

#### **3.3.2.1 Parâmetros internos**

Os parâmetros internos são aqueles que podem influenciar diretamente no algoritmo da CDI durante o processo de correspondência. Dentre esses parâmetros, os principais são: função do algoritmo, dimensões do bloco, dimensões da região de interesse e função interpoladora.

- **Funções**

A função do algoritmo impacta no tempo de processamento a cada iteração, ao calcular a correspondência de cada ponto em cada frame. Contudo, esse parâmetro muitas vezes não pode ser modificado devido às limitações dos *softwares* utilizados. A função interpoladora também desempenha um papel crucial, pois é responsável por medir os deslocamentos com alta precisão.

- **Dimensões do bloco**

O tamanho do bloco está relacionado ao padrão estocástico aplicado à superfície do corpo de prova, à deformação que o objeto está sofrendo e à resolução da imagem capturada. Dessa forma, o tamanho do bloco deve ser ajustado de acordo com o padrão estocástico, considerando a densidade e o tamanho dos grãos do corpo de prova. Um bloco maior tende a gerar resultados mais precisos, pois reduz a incerteza dos deslocamentos. No entanto, se o bloco for muito grande em comparação com a região de interesse, pode ser difícil obter uma correspondência adequada (BELEZA, 2017).

- Região de interesse

A região de interesse corresponde à área da imagem que será analisada pelo algoritmo para buscar as correspondências. A influência desse fator ocorre quando, ao comparar imagens, o ponto de interesse pode se deslocar para fora dessa região, fazendo com que a correspondência seja perdida.

### **3.3.2.2 Parâmetros externos**

De acordo com Beleza (2007), os parâmetros externos estão relacionados à forma como o experimento é conduzido, incluindo fatores como resolução da câmera, padrão estocástico, frequência de captura das imagens, iluminação e distorção das lentes.

- Resolução da câmera

A resolução da câmera deve ser ajustada conforme a área que será analisada e a distância entre a câmera e o corpo de prova (CP). Quanto maior a resolução, maior a precisão nos detalhes da imagem, mas isso também pode aumentar o tempo de processamento.

- Padrão estocástico

Como mencionado anteriormente, o padrão estocástico é essencial para o método de correlação de imagem digital. A distribuição uniforme do padrão é crucial, e o tamanho do bloco deve ser ajustado adequadamente às dimensões do padrão. Se o padrão não for distribuído uniformemente ou se o bloco for muito pequeno, pode ocorrer múltiplas correspondências para o mesmo bloco, resultando em um fenômeno de descorrelação.

- Iluminação

A iluminação artificial durante os ensaios ajuda a evitar mudanças de brilho na imagem, que poderiam alterar a intensidade dos pixels e afetar os resultados. O uso de iluminação controlada proporciona uma maior estabilidade nas condições do experimento, permitindo medições mais precisas.

- Frequência de Aquisição

A frequência de aquisição das imagens deve ser ajustada de acordo com as condições do ensaio. Considerando a velocidade do ensaio e a deformação sofrida pelo CP, é importante equilibrar a quantidade de imagens capturadas com o tempo de processamento computacional, já que uma grande quantidade de imagens pode aumentar significativamente o tempo necessário para a análise.

- Distorção das lentes

Toda lente de câmera digital apresenta distorções naturais, que podem afetar a precisão das imagens capturadas. Para compensar esse efeito, o algoritmo de CDI deve possuir um coeficiente de distorção, que pode ser calculado por meio da calibração da câmera com padrões específicos ou por um processo iterativo.

### **3.3.3 Softwares de CDI**

Existem alguns *softwares* que realizam a medição de deformação por correlação de imagem digital. Alguns deles são o ZEISS Inspect Correlate, Vic-3D, OpenCV e Ncorr. De acordo com Schreier (2009), todos esses *softwares* utilizam algoritmos que registram o padrão da região de interesse pelo contraste de textura da imagem e, ao longo do ensaio, buscam esse mesmo padrão a cada imagem. Assim, é obtido o deslocamento pela diferença entre a posição inicial e a posição em que o padrão se encontra no *frame* atual, em micrômetros.

#### **3.3.3.1 ZEISS Inspect Correlate**

Antes conhecido como GOM Correlate, o ZEISS Inspect Correlate é um *software* para correlação de imagem digital e rastreamento de movimento 3D. Com ele, é possível analisar processos dinâmicos, como deslocamentos, rotações ou mudanças de ângulo. É equipado com algoritmos de CDI e rastreamento de pontos para medição precisa de subpixels de coordenadas 3D e rastreamento ao longo do tempo (ZEISS, 2023).

Entre as suas vantagens, destacam-se a fácil instalação e o fato de que as imagens precisam de apenas um simples tratamento prévio dentro do próprio ZEISS após seu carregamento para o *software*. Seu funcionamento segue o princípio do algoritmo de análise de CDI, conforme indicado no tópico 3.1.4.

### 3.3.3.2 NCORR

O NCORR (2024) descreve-se como um programa gratuito e de código aberto para correlação digital de imagens 2D no *MATLAB*. Ele foi desenvolvido para ser intuitivo e acessível, oferecendo uma interface amigável e ferramentas gráficas para análise e visualização de resultados. Para garantir eficiência, os cálculos mais pesados são otimizados com C++/MEX, enquanto a interface é programada em *m-code*.

No site oficial é possível encontrar exemplos de aplicação, guias sobre a coleta de dados e uma seção dedicada à explicação dos algoritmos, além de um espaço para sugestões e melhorias feitas pela própria comunidade (NCORR, 2024).

### 3.3.3.3 VIC-3D

O VIC-3D (2024) é descrito como um sistema completo e avançado para medição e visualização de forma, deslocamento e deformação em 3D, utilizando a técnica de correlação digital de imagens. Com essa tecnologia, é possível analisar deslocamentos e deformações tridimensionais em cada pixel da superfície do material testado.

CORRELATED SOLUTIONS (2024) também aponta que cada sistema é personalizado para atender a diferentes escalas de tamanho e pode ser usado tanto em testes estáticos quanto dinâmicos. Além disso, o VIC-3D é entregue pronto para uso, incluindo todo o *software* e *hardware* necessários, além de treinamento e suporte técnico, garantindo que o sistema funcione conforme o esperado.



## **4 METODOLOGIA**

Os ensaios para este trabalho foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção, na Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Para atingir o objetivo proposto no trabalho, de medir o deslocamento e gerar o gráfico de tensão-deformação por meio da correlação de imagens no ensaio de compressão uniaxial, a metodologia foi dividida em cinco etapas, descritas a seguir:

- Primeira etapa - seleção e coleta dos blocos de esteatito;
- Segunda etapa - preparação das amostras;
- Terceira etapa - montagem do arranjo experimental e execução dos ensaios;
- Quarta etapa - processamento das imagens e dados dos ensaios;
- Quinta etapa - análise dos resultados.

### **4.1 Seleção e coleta dos blocos de esteatito**

A seleção de blocos de esteatito foi realizada em uma pedreira de pequeno porte no distrito de Santa Rita de Ouro Preto, município de Ouro Preto, Minas Gerais, região onde existem várias outras extrações de esteatito para diversas aplicações, dentre elas o uso como matéria-prima para a fabricação do popularmente conhecido artesanato em pedra-sabão.

O esteatito de Santa Rita de Ouro Preto escolhido é rico em mineral talco, o que, juntamente com o grau de intemperismo do material, lhe confere alguma maciez, sendo possível escarificá-lo e moldá-lo sem que a rocha perca a integridade de sua matriz.

Para esta pesquisa, foram selecionados blocos de esteatito ricos em talco e com grau de intemperismo W1 e W2 (ISRM, 1978), respectivamente rocha sã e rocha pouco alterada. Tais blocos foram coletados da frente de lavra em dimensões suficientes para a extração e moldagem de corpos-de-prova nas dimensões requeridas para o ensaio de compressão uniaxial em blocos de rocha (ASTM, 2017).

## 4.2 Preparação das amostras

Para a realização dos testes, as amostras de esteatito de tamanhos e formas irregulares foram enviadas a uma empresa de corte, usinagem e retífica para produção de artesanato em pedra-sabão, também localizada em Santa Rita de Ouro Preto. Nessa etapa, por meio de ferramentas de corte (serras diamantadas) e torno, foram confeccionados corpos de prova com geometria aproximadamente cúbica, seguindo o preconizado em norma técnica internacional (ASTM, 2017) (Figura 4).

Em seguida, os blocos de esteatito, de geometria aproximadamente cúbica (50 x 50 x 50 mm), tiveram uma de suas faces pintadas conforme o procedimento descrito a seguir.

Utilizando tinta *spray* branco fosco, toda a face foi pintada nessa cor, estabelecendo-se um plano de fundo claro e fosco para a etapa seguinte.

Após a secagem da tinta branca, foi realizada, manualmente, a geração de um padrão aleatório de pontos pretos dispersos no plano de fundo branco, por meio do borrifamento de tinta *spray* preto fosco, a uma distância e com uma vazão diferentes para cada corpo de prova, com o intuito de formar padrões distintos (Figura 5).



Figura 4 – Amostras preparadas

Fonte: Acervo do autor

Figura 5 – Amostras com superfícies pintadas

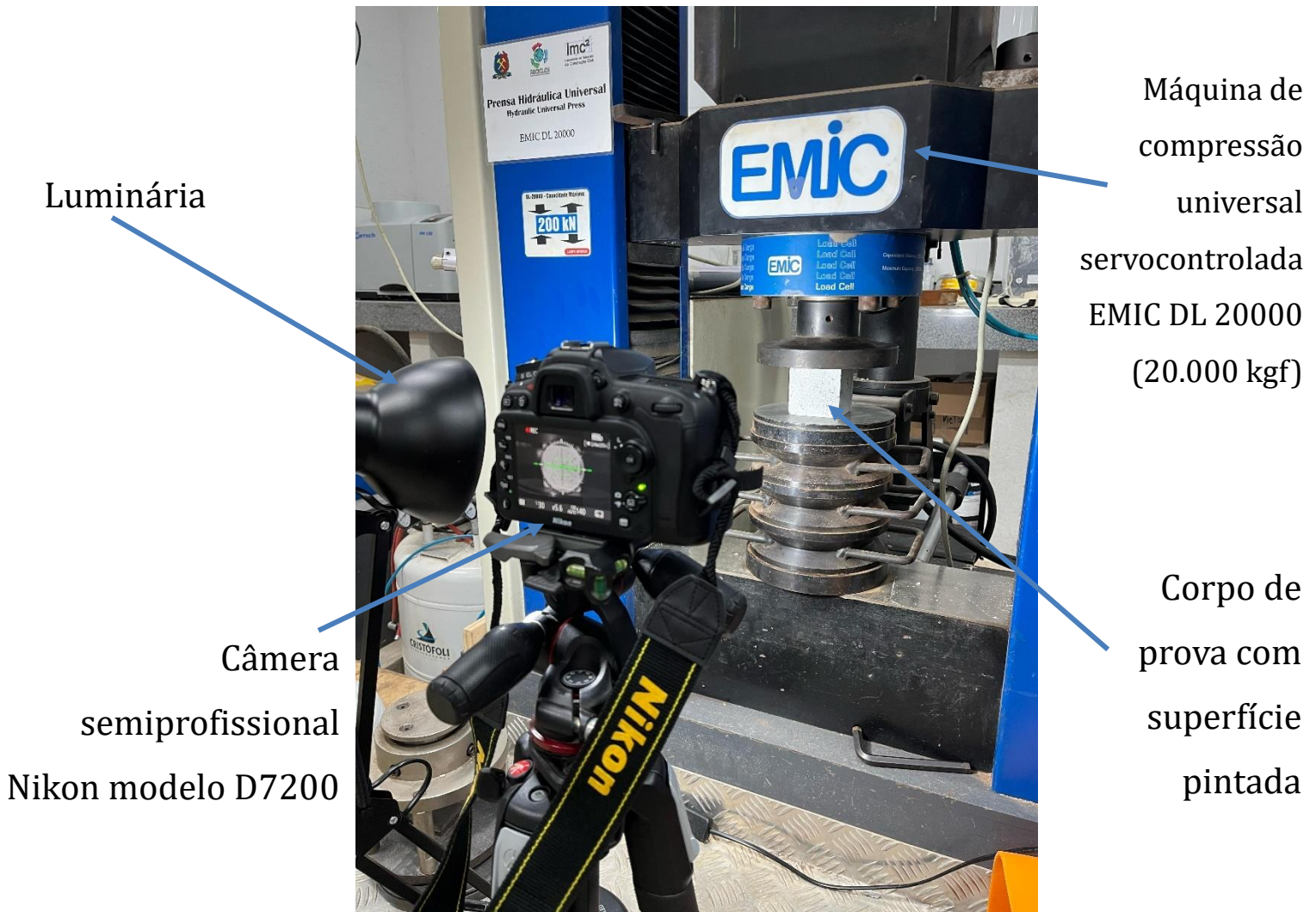


Fonte: Acervo do autor

### **4.3 Montagem do arranjo experimental e execução dos ensaios**

O arranjo experimental, cujo esquema é ilustrado pela Figura 6, consistiu na execução da compressão uniaxial dos cubos de esteatito e filmagem da face do corpo de prova pintada com o padrão de pontos aleatórios. Tal arranjo foi composto pela utilização de uma máquina de compressão universal servocontrolada EMIC DL 20000 (20.000 kgf), do Laboratório de Materiais de Construção da Escola de Minas da UFOP, e de uma câmera semiprofissional Nikon modelo D7200. A compressão uniaxial ocorreu a uma taxa de carregamento de 0,085 Megapascal (MPa) por segundo (s), atendendo ao estabelecido na ASTM (2017). A filmagem da face do corpo de prova pintado com o padrão de pontos aleatórios ocorreu a uma taxa de 60 *frames* por segundo e com o ISO automático.

Figura 6 – Arranjo experimental



Fonte: Acervo do autor

#### 4.4 Processamento das imagens e dados dos ensaios

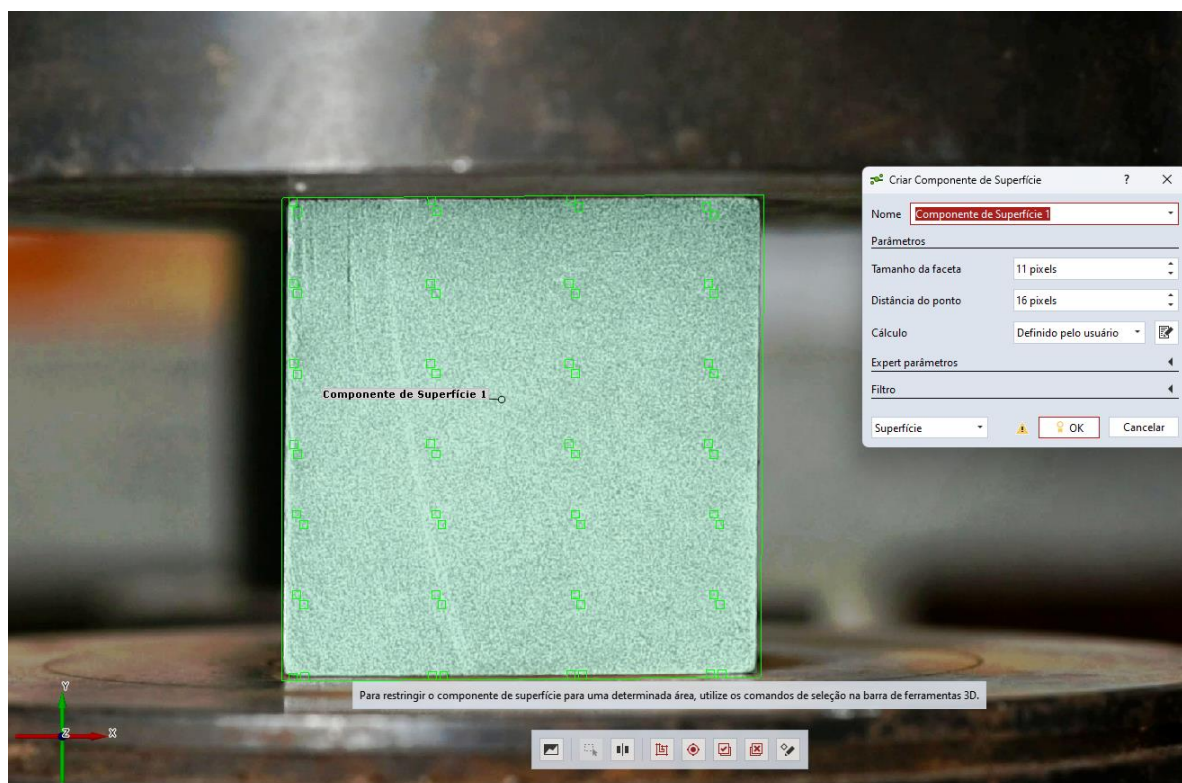
Devido ao longo tempo do ensaio, o tamanho do vídeo obtido ficou excessivamente grande, impossibilitando o computador de processá-lo no *software* ZEISS Inspect Correlate. Portanto, foi usado um programa gratuito (ffmpeg V.7.1) para dividir o vídeo em 1 *frame* por segundo, o que, embora gerasse uma sequência com grande quantidade de imagens, tornou o arquivo do projeto muito menor, possibilitando que estas fossem analisadas pelo ZEISS Inspect Correlate.

#### 4.4.1 Determinação da região de interesse e escala

Após preparar a amostra, é necessário avaliar a qualidade da superfície (a face filmada no ensaio de compressão) tratada. Esse processo consiste em capturar uma imagem da superfície e verificar o contraste dela no *software* escolhido para este trabalho, que, no caso, foi a versão gratuita do ZEISS Inspect Correlate 2023. Para cada componente de superfície criado, deve-se garantir que este atenda aos padrões de qualidade antes de iniciar o teste. Nesse estágio, seleciona-se apenas a área específica que será analisada, uma vez que a gravação do teste geralmente inclui imagens da prensa, do fundo do corpo de prova e de outras informações irrelevantes que podem estar no cenário do ensaio. A Figura 7 ilustra uma captura de imagem no momento da criação do componente de superfície no *software*, destacando a definição da região de interesse antes do início do ensaio de compressão uniaxial.

Com o componente de superfície definido, sua função será monitorar a deformação ocorrida na superfície na direção  $\epsilon_x$ . Em cada *frame* do vídeo, o componente ajustará as cores para representar as variações de deformação, proporcionando uma visualização clara das alterações ao longo do ensaio.

Figura 7 – Criação do componente de superfície do CP



Fonte: Acervo do autor

Após a criação do componente de superfície, é necessário definir uma medida de referência no *software* para garantir a identificação e leitura precisa das deformações sofridas pelo corpo de prova. Essa escala em 2D foi aplicada a todos os *frames* do ensaio. Com base no tamanho exato da face do cubo em análise, definiu-se a escala selecionando dois pontos em vértices consecutivos e especificando a distância conhecida entre eles.

#### 4.4.2 Alinhamento dos dados obtidos pela prensa com os dados capturados pelo Inspect Correlate

O alinhamento entre os dados obtidos pela prensa (força aplicada em função do tempo) e os deslocamentos medidos por meio do *software* de CDI foi realizado para correlacionar, de forma precisa, os esforços aplicados à deformação da amostra durante o ensaio de compressão uniaxial. Esse procedimento envolveu algumas etapas, as quais serão descritas a seguir.

#### 4.4.2.1 Preparação dos dados da prensa

A prensa utilizada no ensaio registrou os valores de força (em newtons, N) aplicados na amostra ao longo do tempo, com resolução em milissegundos. Inicialmente, observou-se que o registro da prensa apresentava uma alta densidade de dados (com mais de 3000 pontos) em comparação com o número de *frames* capturados no vídeo (1 *frame* por segundo, resultando em 1182 imagens no CP1). Essa disparidade temporal exigiu o agrupamento e simplificação dos dados da prensa para garantir sua compatibilidade com os deslocamentos obtidos do *software*.

Para reduzir a densidade dos dados e suavizar flutuações, calculou-se a força média para cada segundo de ensaio. Isso foi feito utilizando a ferramenta de planilhas Excel, conforme detalhado a seguir.

- Foi extraído o tempo inteiro correspondente a cada registro, desprezando os milissegundos. Esse valor foi inserido em uma nova coluna denominada "Tempo Inteiro", usando a função =INT(Tempo\_original).
- Utilizou-se a função MÉDIASE para calcular a força média de todos os registros dentro de cada segundo. Essa força média foi armazenada em uma nova coluna e passou a representar a força aplicada no intervalo de um segundo. Dessa forma, os dados foram reduzidos para um conjunto de valores de força média associados a segundos inteiros.

#### 4.4.2.2 Processamento dos deslocamentos obtidos pelo software de Correlação Digital de Imagem

O Inspect Correlate processou os *frames* capturados durante o ensaio, resultando em uma tabela com os deslocamentos (em milímetros) para pontos específicos da superfície da amostra. Esses deslocamentos estavam organizados *frame a frame*, com uma taxa de captura de 1 *frame* por segundo, totalizando 1182 registros de deslocamento ao longo do ensaio. Como cada *frame* correspondia a um segundo inteiro, os deslocamentos capturados foram diretamente associados ao mesmo intervalo de tempo utilizado na etapa de agrupamento dos dados da prensa.



## Cálculo de Tensão e Deformação

Após o alinhamento temporal dos dados, foram calculados os valores de tensão e deformação, necessários para a construção do gráfico tensão-deformação:

- **Tensão ( $\sigma$ ):** calculada a partir da força média (em N) dividida pela área da seção transversal do corpo de prova (51 mm<sup>2</sup>), conforme a fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Os valores resultantes foram expressos em megapascals (MPa).

- **Deformação ( $\epsilon$ ):** calculada como a razão entre o deslocamento ( $\Delta L$  em mm) e o comprimento inicial da amostra ( $L_0$ , em mm), conforme a fórmula:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5)$$

Os valores foram apresentados em sua forma adimensional ou como porcentagem.

### 4.5 Construção do Gráfico Tensão-Deformação

Com os valores de tensão e deformação alinhados temporalmente, foi construído o gráfico tensão-deformação no Excel. A deformação média foi calculada com base nos deslocamentos registrados por extensômetros digitais aplicados à superfície da amostra, obtendo-se uma única curva representativa para o corpo de prova ensaiado.

O gráfico resultante permitiu a análise do comportamento mecânico da rocha durante o ensaio, evidenciando as fases elástica e plástica, bem como os momentos de alívio ou flutuação de carga registrados pela prensa. A amostra não se rompeu durante a fase de filmagem do ensaio. No entanto, após a finalização das capturas, o ensaio foi continuado até a ruptura da amostra para posterior comparação entre as fissuras formadas e as previsões do *software* na correlação digital de imagem.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra de esteatito testada possuía dimensões de 51 mm x 51 mm x 51 mm e foi preparada conforme descrito na metodologia.

Durante o ensaio, a amostra foi submetida a esforços crescentes até atingir a força máxima de 71159 kN, o que corresponde a uma tensão máxima de 27,358 MPa, calculada pela relação entre a força aplicada e a área da seção transversal da amostra na direção do carregamento. A deformação máxima observada foi de 3,16%, conforme registrado pelos extensômetros no *software* Inspect Correlate.

Apesar do aumento progressivo da carga, a amostra não apresentou ruptura visível ao final do ensaio. Esse comportamento pode ser atribuído à alta resistência intrínseca do esteatito, característica comum em materiais com elevada coesão interna.

Os dados obtidos foram utilizados para construir o gráfico do comportamento do extensômetro 1 diante da tensão aplicada ao longo dos *frames* (Figura 8). A análise desse gráfico indica que o comportamento da amostra permaneceu predominantemente elástico durante o ensaio de compressão uniaxial realizado de forma cíclica. Nesse tipo de ensaio, a carga aplicada pela prensa foi periodicamente aliviada, gerando ciclos de carregamento e descarregamento visíveis na curva. Esse procedimento permite avaliar a resposta mecânica do material sob condições de carregamento não contínuo, fornecendo informações adicionais sobre suas propriedades.

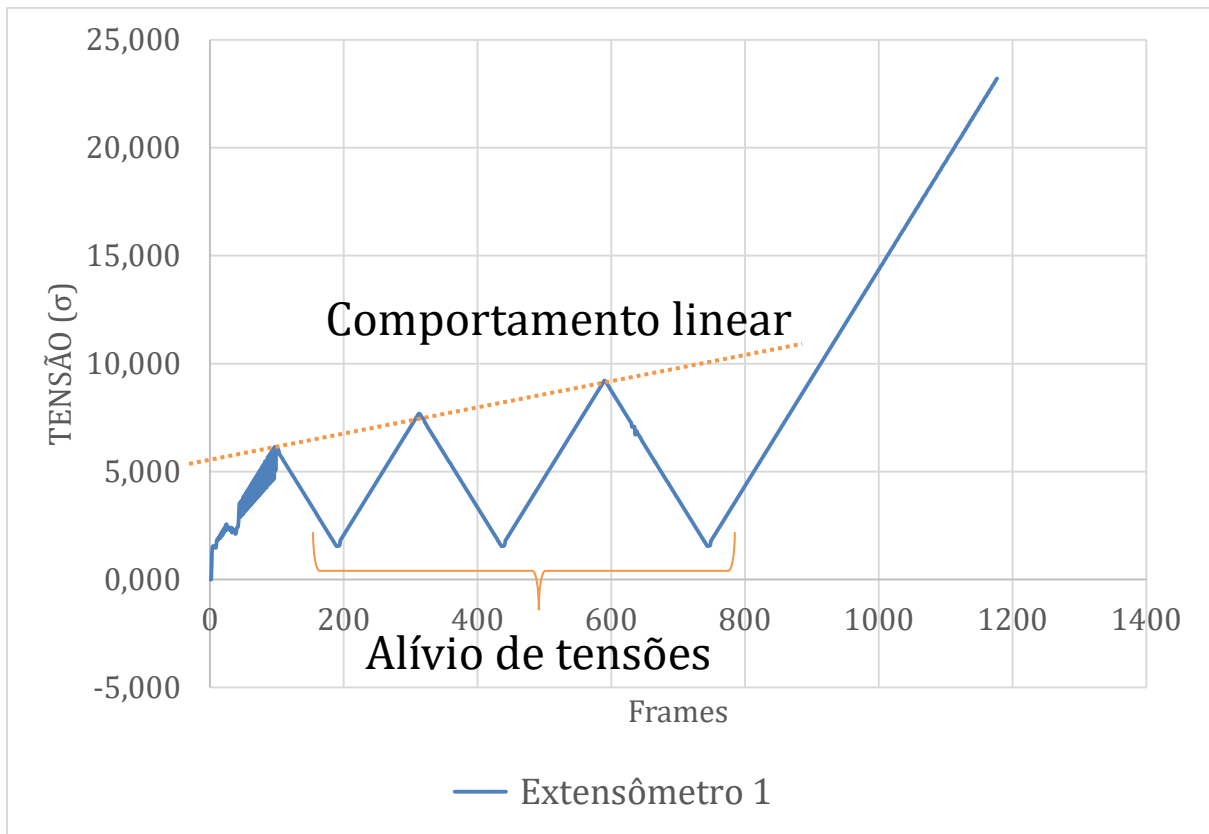
Não foi identificado o ponto de ruptura, uma vez que a amostra manteve sua integridade até o término do ensaio.

A Tabela 1 resume os principais resultados obtidos durante o ensaio:

Tabela 1: Principais resultados do ensaio.

Parâmetro	Valor	Unidade
Força máxima ( $F_{máx}$ )	71159,00	kN
Tensão Máxima ( $\sigma_{máx}$ )	27,358	MPa
Deformação máxima ( $\epsilon_{máx}$ )	3,16	%

Figura 8 – Gráfico Tensão-Frames



Fonte: Acervo do autor

Comportamento Observado:

### 1. Fase Inicial (Carregamento Linear)

Nos primeiros ciclos, observa-se um comportamento predominantemente linear, com a tensão aumentando proporcionalmente ao longo do tempo. Essa fase reflete o comportamento elástico do material, no qual as deformações são reversíveis e não há danos acumulados significativos.

### 2. Picos de Tensão Máxima

A tensão média máxima registrada ao longo do ensaio foi de aproximadamente 25 MPa, obtida no último ciclo de carregamento. Este valor indica a resistência do material sob o regime de carregamento cíclico e apesar das cargas elevadas, a amostra não apresentou ruptura visível, reforçando a elevada coesão e ductilidade do esteatito.

### 3. Alívio de Tensão e Deformação Residual

Durante os momentos de alívio de carga, é possível observar que a tensão retorna a valores próximos de zero. Contudo, a deformação acumulada (residual) aumenta gradativamente a cada ciclo.

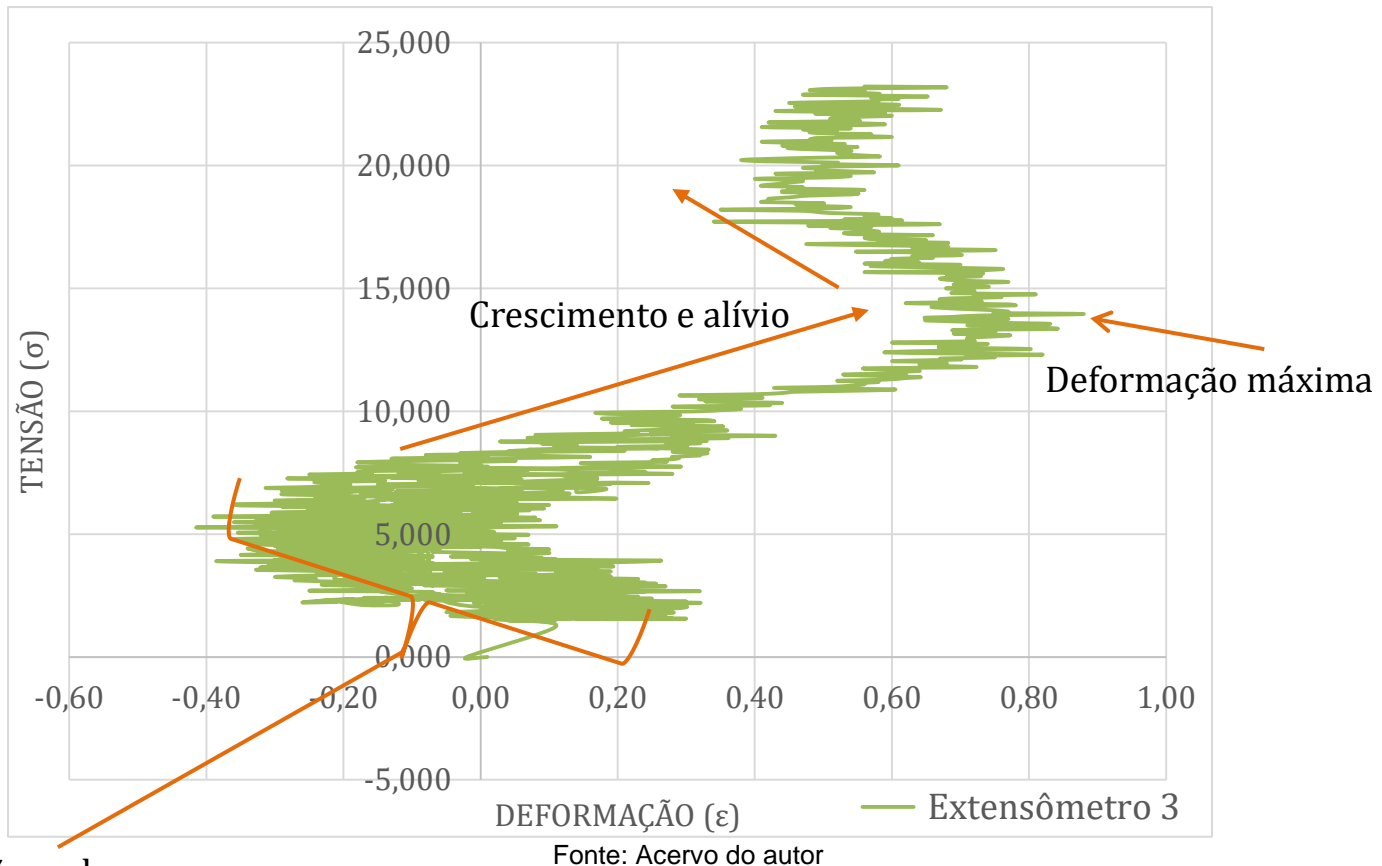
Esse comportamento é típico de materiais submetidos a carregamento cíclico, indicando uma possível redistribuição interna de tensões e microdeformações permanentes no material.

#### 4. Crescimento da Deformação Acumulada

A deformação máxima aumentou progressivamente ao longo dos ciclos, evidenciando um acúmulo de deformações irreversíveis. Esse comportamento pode ser associado ao início de microfissuras ou deslizamentos internos, mesmo sem ruptura macroscopicamente observável.

A Figura 9 apresenta graficamente o comportamento tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ) obtido a partir dos três extensômetros, que registraram os dados de deformação na superfície da amostra. O gráfico evidencia o padrão de carregamento cíclico do ensaio, caracterizado pela aplicação e alívio periódico de carga pela prensa, destacando aspectos relevantes para análise.

Figura 9 – Gráfico Tensão-Deformação



Zona de  
dispersão inicial

Pelas Figuras 3,8 e 9, pode-se realizar as seguintes interpretações:

#### 1. Zona de dispersão inicial

No início do ensaio, o gráfico apresenta uma considerável dispersão em torno de valores baixos de tensão ( $\sigma < 5 \text{ MPa}$ ) e deformação ( $\epsilon$  próxima a zero).

Esse comportamento pode ser atribuído a pequenos ajustes iniciais da prensa, deslocamento interno do sistema ou recalibração do contato entre o corpo de prova e os extensômetros.

#### 2. Crescimento Linear e Alívio

A partir de  $\sigma \approx 5 \text{ MPa}$ , observa-se um padrão de crescimento linear seguido de uma redução cíclica da tensão (que pode ser mais bem observada pela figura 6), característica do carregamento cíclico.

A deformação acumulada ( $\epsilon$ ) aumenta de forma progressiva, mesmo após os ciclos de alívio, indicando o acúmulo de deformações plásticas no material.

### 3. Tensão e Deformação Máxima Registrada

A Figura 9 apresenta uma tensão máxima de aproximadamente 25 MPa e uma deformação acumulada máxima em torno de 1,0%. Esses valores indicam que, embora o ensaio não tenha levado à ruptura da amostra, o material atingiu um regime plástico. Apesar das tensões elevadas e do acúmulo de deformações, não houve ruptura macroscópica, evidenciando a elevada resiliência e ductilidade do esteatito — características fundamentais para aplicações estruturais ou de revestimento em condições adversas.

Além disso, o aumento contínuo da deformação acumulada é um indicador da plasticidade do material. Esse comportamento é característico de materiais submetidos a ciclos repetitivos e reflete o início de danos estruturais microscópicos, como microfissuras.

#### 5.1 Análise combinada das Figuras 8 e 9

Ao combinar os dois gráficos, torna-se evidente o complemento entre as análises de tensão x *frames* e tensão x deformação. A figura 8 fornece uma visão geral do ensaio, destacando o comportamento cíclico da prensa, enquanto a Figura 9 aprofunda os detalhes mecânicos, revelando fenômenos como dispersão inicial e a ductilidade do material.

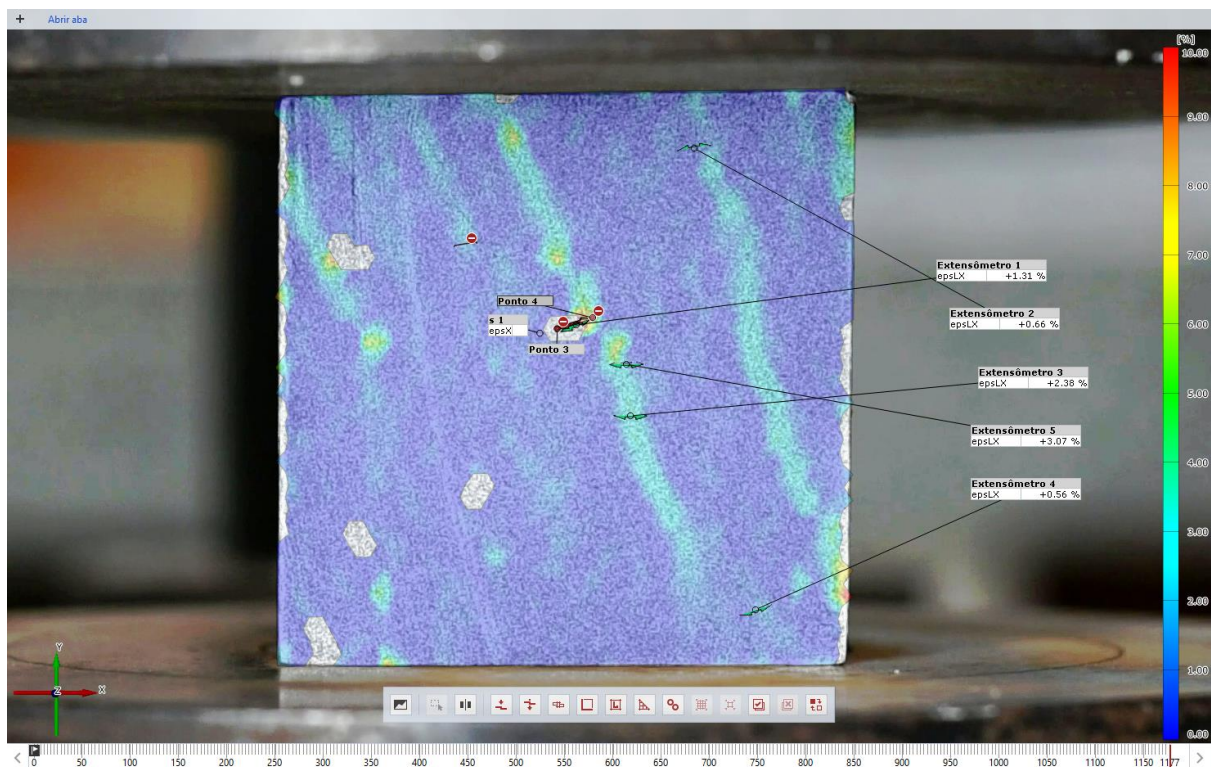
A análise conjunta reforça a confiabilidade dos dados e demonstra a eficácia do método de correlação digital de imagens (CDI) na mensuração das deformações. A coleta precisa dos deslocamentos ao longo dos *frames*, somada à calibração do extensômetro e à definição da escala, permitiu uma representação precisa das variáveis mecânicas, fundamentais para a análise das características geomecânicas do esteatito.

## 5.2 Correlação entre Deformações Observadas e o Local de Ruptura

Após a conclusão do ensaio cíclico de compressão uniaxial, o corpo de prova foi submetido a um carregamento contínuo até o ponto de ruptura, mas não foi registrado pelo vídeo, apenas tirada uma foto no momento da ruptura.

Por meio da correlação digital de imagens, foi possível identificar e mapear as regiões com maiores concentrações de deformação ao longo do ensaio. A Figura 10 apresenta o último *frame* obtido pela CDI ao final do ensaio inicial, destacando, em escala percentual, as áreas críticas onde se concentraram as maiores deformações.

Figura 10 - Registro das deformações lidas pelo *software* no último *frame*



Essas concentrações de deformação indicam as zonas onde o material apresentou maior acumulação de energia interna, resultando em tensões localizadas que antecederam a ruptura. As áreas em destaque no mapa de deformações exibem regiões predominantemente alinhadas às fraturas observadas na Figura 11, que apresenta o corpo de prova após a ruptura. No decorrer do

carregamento, os deslocamentos registrados pela CDI indicaram o avanço das deformações localizadas, que culminaram na ruptura do CP. Observou-se que as fraturas formadas no material seguiram padrões consistentes com as regiões de maior deformação destacadas pela CDI. Essa observação permite inferir que o método é capaz de prever, com precisão, o ponto inicial e a progressão das rupturas no material testado.

Figura 11 - Registro do corpo de prova após a ruptura



Fonte: Acervo do autor

Além disso, o alinhamento entre os dados obtidos pela CDI e a morfologia das fraturas no CP demonstra a capacidade do método de oferecer uma visão ampla do comportamento da rocha sob compressão. Enquanto a CDI possibilitou a observação em tempo real da evolução das deformações durante o ensaio, o comportamento pós-ruptura do CP revelou as consequências estruturais dessas deformações acumuladas.



Com isso, a comparação entre o mapeamento das deformações e a estrutura final do corpo de prova demonstra a coerência entre os dados obtidos e o comportamento real da rocha. Esse alinhamento reforça a aplicabilidade da CDI como ferramenta complementar na caracterização das propriedades mecânicas de materiais geológicos, contribuindo para a identificação precoce de rupturas e para o entendimento das respostas estruturais durante os ensaios.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este trabalho teve como objetivo aplicar a técnica de Correlação Digital de Imagens (CDI) para avaliar o comportamento mecânico do esteatito e analisar suas deformações em ensaios de compressão uniaxial. Os resultados obtidos permitem não apenas compreender melhor o comportamento do material, mas também evidenciam a potencialidade da CDI como ferramenta experimental complementar na engenharia.

O uso da CDI também se mostrou essencial na obtenção de dados que complementaram as informações tradicionais registradas pela prensa. A comparação entre o gráfico tensão-*frames* e o gráfico tensão-deformação, gerado a partir das informações de deslocamento da CDI, forneceu uma base mais robusta para a análise das propriedades mecânicas do material. Além disso, a identificação de deformações localizadas foi fundamental para compreender o comportamento do esteatito frente aos esforços cíclicos aplicados, demonstrando que, mesmo antes da ruptura, o material apresentou padrões claros de concentração de tensões.

Em termos práticos, os resultados obtidos destacam a aplicabilidade da CDI em estudos experimentais relacionados à mecânica das rochas e à engenharia de materiais. Essa técnica tem potencial para ser utilizada em contextos mais amplos, como na análise de deformações em projetos de engenharia geotécnica, no monitoramento de estruturas rochosas e na caracterização de novos materiais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ASTM INTERNATIONAL.** Método de Teste Padrão para Determinar a Resistência à Compressão de Pedras Ornamentais. C170/C170M-2017. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

AZEVEDO, I. C. D., MARQUES, E. A. G. **Introdução a Mecânica das Rochas.** 1 ed. Viçosa: UFV, 2002. 363p.

DA SILVA, Angelo Quintiliano Nunes. Correlação de imagens digitais em ensaios de compressão diametral em rochas. 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/30275>. Acesso em: 07 mai. 2024.

FARMER, I. W. (1968). **Engineering Properties of Rocks.** Spon Editors, London.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas:** aspectos geotécnicos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 26 jan. 2024.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens.** 3. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2009. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 06 maio 2024.

International Digital Image Correlation Society (iDICs), Jones, E. M. C., & Iadicola, M. A. (Eds.). (2018). A Good Practices Guide for Digital Image Correlation. Disponível em: <https://idics.org/guide>. Acesso em: 07 mai. 2024.

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W.; ZIMMERMAN, R. W. **Fundamentals of rock mechanics.** 4th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2007.

JAIQUES, Daniel Silva. Caracterização morfológica, mineralógica e geomecânica de perfis de intemperismo de rochas graníticas em clima tropical. 2019. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MOREIRA, Pedro Gil Marques Oliveira. Desenvolvimento de Algoritmo de Correlação digital de imagem para Avaliação de grandes deformações. 2015.

PANITZ, Jhoan Sadith Paredes. Desenvolvimento e implementação de metodologias para a determinação da deformabilidade e tensões em maciços gnáissicos. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SCHREIER, H., ORTEU, J.-J., & SUTTON, M. A. (2009). Digital Image Correlation (DIC). In Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Springer US.

SUTTON, Michael A.; ORTEU, Jean Jose; SCHREIER, Hubert. **Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications**. Springer Science & Business Media, 2009.

VALLEJO, L. I. G., FERRER, m., ORTUÑO, L., & OTEO, C. (2002) **Ingeniería Geológica**. Prentice Hall, Madrid, 117-236p.

[VIC-3D — Correlated Solutions Digital Image Correlation](https://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/). Disponível em: <https://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

[ZEISS INSPECT Correlate: Easy evaluation of dynamic measurements](https://www.zeiss.com/metrology/products/software/inspect/correlate.html), Disponível em: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/inspect/correlate.html>. Acesso em: 07 jun. 2024.