

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ANDRESSA MARQUES MINICH

**UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL ALIADA A MODELAGEM
NUMÉRICA PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA PONTE
NATURAL DE PEDRA DE ALEGRETE-RS**

**Alegrete
2020**

ANDRESSA MARQUES MINICH

**UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL ALIADA A MODELAGEM
NUMÉRICA PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA PONTE
NATURAL DE PEDRA DE ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Diego Arthur Hartmann.

**Alegrete
2020**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

M665u Minich, Andressa Marques

Utilização da fotogrametria digital aliada a modelagem numérica para previsão do comportamento mecânico da ponte natural de pedra de Alegrete-RS / Andressa Marques Minich.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA CIVIL, 2020.

"Orientação: Diego Arthur Hartmann".

1. Ponte de pedra. 2. Fotogrametria digital. 3. Structure From Motion. 4. Métodos dos elementos finitos. 5. ABAQUS. I. Título.

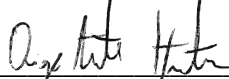
ANDRESSA MARQUES MINICH

**UTILIZAÇÃO DA FOTOGRAMETRIA DIGITAL ALIADA A MODELAGEM
NUMÉRICA PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA PONTE
NATURAL DE PEDRA DE ALEGRETE-RS**


Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 27 novembro de 2020.

Banca examinadora:



Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Maurício Silveira dos Santos
UNIPAMPA



Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família, meus pais Cláudia e Gilberto e aos meus irmãos Guilherme e Pedro.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho consistiu em analisar o comportamento mecânico da ponte natural de pedra de Alegrete/RS através de fotogrametria digital aliada a simulações em elementos finitos. A complexa geometria da ponte de pedra foi obtida através da técnica de fotogrametria digital aliada a tecnologia de reconstrução tridimensional *Structure From Motion*, utilizando-se o software *3DFlow 3DF Zephyr*. A orientação das faces geológicas planares das laterais norte e sul da ponte de pedra foram determinadas através do *plugin* de geologia estrutural *FACETS*, incorporado ao software *CloudCompare*. As propriedades mecânicas, necessárias para a simulação numérica, foram estimadas através de correlações empíricas e do ensaio esclerômetro de Schmidt. O modelo tridimensional foi importado para o software *ABAQUS*, onde foi possível estimar a distribuição das tensões principais causadas pela atuação da força gravitacional no maciço. Através da fotogrametria digital aliada a *Structure From Motion* foi possível obter produtos fotogramétricos como o modelo tridimensional, modelo digital de elevação e ortofoto. Estes, possibilitam o monitoramento de processos erosivos, mudanças no relevo e obtenção de propriedades geométricas. Além disso, a partir da nuvem de pontos gerada na etapa de modelagem tridimensional, foi possível obter a orientação das principais faces planares da ponte de pedra. Os valores médios de mergulho obtidos nesta etapa afirmam a verticalidade das descontinuidades para ambas as faces. As simulações numéricas em elementos finitos possibilitaram a estimativa da distribuição de tensões principais na ponte de pedra, cujos valores verificados para as tensões mínimas e máximas principais são, respectivamente, 10 e 30 MPa.

Palavras-Chave: Ponte de pedra; Fotogrametria digital; *Structure From Motion*; Métodos dos elementos finitos; ABAQUS; Descontinuidades;

ABSTRACT

The main objective of this work was to analyze the mechanic behavior of a natural stone bridge in Alegrete/RS through the digital photogrammetry combined with finite element method. The complex geometry of the rock mass was obtained through digital photogrammetry coupled with Structure From Motion technique, a three-dimensional reconstruction technology, using the software 3DFlow 3DF Zephyr. The orientation of the geological planar faces of both north and south sides of the natural stone bridge were determined through FACETS, a geological structural plugin incorporated to CloudCompare software. Essential mechanical properties for numerical simulations were estimated through empirical correlations and Schmidt hammer rebound values. The three-dimensional model was imported to ABAQUS, allowing the estimation of the gravitational stress distribution in the rock mass. Through digital photogrammetry combined with Structure From Motion it was possible to obtain photogrammetric products such as the three-dimensional model, digital elevation model and orthophoto. These make it possible to monitor erosive processes, changes in relief and obtain geometric properties. In addition, from the point cloud generated in the three-dimensional modeling stage, it was possible to obtain the orientation of the main planar faces of the stone bridge. The average values of dipping obtained in this stage affirm the verticality of the discontinuities for both faces. The numerical simulations in finite elements made it possible to estimate the distribution of main stresses in the stone bridge, whose values verified for the minimum and maximum principal stresses are, respectively, 10 and 30 MPa.

Keywords: Natural Stone Bridge; Digital Photogrammetry; *Structure From Motion*; Finite Element Method; *ABAQUS*; Discontinuities;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema das propriedades geométricas das discontinuidades.	18
Figura 2- Principais fases da fotogrametria	20
Figura 3- Representação esquemática da fotogrametria.	22
Figura 4- Sobreposição de imagens adjacentes.	22
Figura 5- Pontos notáveis	23
Figura 6- Posicionamento das câmeras na aquisição de imagens.....	24
Figura 7- Classificação das tensões atuantes em maciços rochosos.	27
Figura 8- Fluxograma da metodologia utilizada.....	30
Figura 9- Ponte natural de Pedra	31
Figura 10- a) Posicionamento da bússola b) Orientação em relação ao Norte Magnético.....	32
Figura 11- Ensaio esclerômetro de Schimidt.....	34
Figura 12- Curvas de iso elasticidade.	36
Figura 13- Ábaco de Miller para determinação da resistência a compressão através da altura de rebote do martelo de Schmidt.....	37
Figura 14- Malha poligonal resultante da etapa de modelagem tridimensional no software 3DFZephyr.....	39
Figura 15- Malha poligonal após a etapa de fechamento através do software MeshMixer.....	40
Figura 16- Malha simplificada através do software MeshLab.....	40
Figura 17- Malha tridimensional após a etapa de solidificação realizada através do software Autodesk Fusion 360.	41
Figura 18- Nuvem de pontos esparsa e posicionamento das câmeras.....	43
Figura 19- Nuvem de pontos densa	44
Figura 20- Modelo tridimensional texturizado.....	45
Figura 21- Ortofoto.....	46
Figura 22- Modelo digital de elevação.....	46
Figura 23- Nuvem de pontos da face norte com indicação da direção de mergulho.	47
Figura 24- Nuvem de pontos da face sul com indicação da direção de mergulho. ...	47
Figura 25- Estereograma das laterais norte (a) e sul (b).....	48
Figura 26- Lateral norte a partir da segmentação pelos algoritmos Kd (a), e Fm (b).....	49
Figura 27- Lateral sul a partir da segmentação pelos algoritmos Kd (a), e Fm (b)....	49

Figura 28- Primeiro refinamento.....	50
Figura 29- Segundo refinamento.....	50
Figura 30- Terceiro refinamento	51
Figura 31- Quarto refinamento.	51
Figura 32- Resultados para a tensão mínima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade mínimo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte.	52
Figura 33-Resultados para a tensão máxima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade mínimo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte.	53
Figura 34- Resultados para a tensão mínima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade máximo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte.	54
Figura 35- Resultados para a tensão máxima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade máximo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte	55
Figura 36- Deformações verticais, em metros, utilizando módulo de elasticidade mínimo a) e máximo b).....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Módulo de elasticidade.....	35
Tabela 2- Estimativas de resistência à compressão.	38
Tabela 3- Valores utilizados nos refinamentos da malha.	41
Tabela 4- Valores médios de mergulho e direção de mergulho obtidos pela segmentação pelos algoritmos KD e FM.....	49

LISTA DE SIGLAS

VANTs – Veículos Aéreos Não Tripulados

SfM – *Structure From Motion*

MEF – Método dos Elementos Finitos

MDE – Modelo Digital de Elevação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo.....	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	Estrutura do trabalho.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Caracterização de maciços rochosos	17
2.2	Fotogrametria	20
2.2.1	Fotogrametria Digital	21
2.2.2	Structure From Motion.....	23
2.2.3	Estudos de caso utilizando fotogrametria em maciços rochosos.....	25
2.3	Tensões e modelagem numérica em maciços rochosos	26
2.3.1	Tensões em maciços rochosos	26
2.3.2	Modelagem numérica em maciços rochosos	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	Objeto de estudo	30
3.2	Estudo fotogramétrico	31
3.2.1	Aquisição das imagens.....	31
3.2.2	Orientação do modelo.....	32
3.2.3	Modelagem tridimensional	32
3.2.4	Mapeamento de faces planares geológicas	33
3.3	Caracterização dos materiais.....	34
3.3.1	Ensaio esclerômetro de Schmidt	34
3.3.2	Módulo de elasticidade	35
3.3.3	Resistência a compressão	36
3.4	Simulação numérica.....	39

4. RESULTADOS.....	43
4.1 Modelagem tridimensional	43
4.2 Mapeamento das faces geológicas planares	47
4.3 Simulação numérica.....	50
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	58
REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A ponte natural de pedra, localizada na cidade de Alegrete/RS, caracteriza-se como uma formação geológica resultante de inúmeros processos erosivos ocorridos ao longo de milhares de anos. Devido a isso, observou-se a possibilidade de criação de um registro permanente da condição estrutural do maciço através da técnica da fotogrametria digital aliada a tecnologia *Structure From Motion (SfM)*.

A fotogrametria digital é a técnica que possibilita a obtenção de espaços tridimensionais a partir de imagens digitais planas (COELHO; BRITO, 2007). Segundo Viana (2015), a técnica é utilizada na área da engenharia geotécnica desde os anos 1960, porém nos últimos anos, os avanços tecnológicos tornaram a reconstrução tridimensional simples, rápida e de baixo custo através da tecnologia *Structure From Motion*. Neste contexto, a fotogrametria digital aliada a modelagem tridimensional *SfM* além de possibilitar o registro permanente da ponte natural de pedra, permite identificar características da superfície rochosa, como por exemplo as descontinuidades.

Na área da engenharia geotécnica, a caracterização de maciços rochosos apresenta-se como uma etapa de suma importância. Tal deve-se à heterogeneidade e ao comportamento geomecânico anisotrópico do maciço, regido tanto pelas propriedades da rocha intacta quanto por suas descontinuidades (VALLEJO *et al.*, 2002). Estas, por serem definidas como planos de fraqueza na estrutura da matriz rochosa, condicionam a deformabilidade, a resistência ao cisalhamento, a permeabilidade e a estabilidade do conjunto (HUDSON; HARRISON, 2000). Desta forma, é justificada a necessidade de um estudo geológico extensivo para representação e quantificação da influência das descontinuidades no comportamento do maciço rochoso.

As propriedades das descontinuidades, tais como espaçamento, persistência e orientação, são geralmente obtidas em campo por meio de técnicas manuais, como o uso de bússola de geólogo e fitas métricas. Porém podem ser necessárias muitas horas de trabalho para a obtenção de uma quantidade suficiente de aferições a partir desta metodologia, a depender da magnitude do maciço em estudo. Ainda, o método tradicional são condicionadas pela acessibilidade física à face do maciço rochoso em estudo (RIQUELME *et al.*, 2014). Por isso, a utilização da fotogrametria digital aliada

a modelagem tridimensional viabiliza a extração semi-automática de informações sobre as propriedades geométricas das descontinuidades presentes do maciço.

O conhecimento do estado de tensões em maciços rochosos é essencial para a avaliação de sua estabilidade. Apesar de existirem diversas técnicas para a determinação do estado de tensões *in situ*, Amadei e Stephansson (1997) citam a necessidade de estimar, mesmo que de forma simplificada, a distribuição das tensões em maciços antes mesmo de realizar as aferições no local. Em função disso, modelagens numéricas em elementos finitos representam uma alternativa capaz de realizar uma estimativa de tensões em maciços rochosos.

Em casos de maciços irregulares, a obtenção da complexa geometria para posterior simulação em elementos finitos pode se tornar um processo difícil. Sendo assim, é necessária a busca de novas técnicas que permitam facilitar esse processo. Neste contexto, a fotogrametria digital vem se mostrando uma técnica promissora, pois permite a reconstrução virtual totalmente automática da superfície de interesse, apenas com imagens obtidas de diferentes ângulos.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico da ponte natural de pedra de Alegrete/RS através de fotogrametria digital aliada a simulações numéricas em elementos finitos.

1.1.2 Objetivos específicos

- Gerar o modelo tridimensional da ponte de pedra;
- Mapear as faces geológicas planares do maciço rochoso;
- Estimar a distribuição de tensões gravitacionais do objeto em estudo através da utilização do *software* de elementos finitos *ABAQUS*.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho estrutura-se em cinco capítulos principais. No primeiro capítulo está apresentada a introdução, objetivos principal específicos desta pesquisa. O capítulo dois contém a revisão de literatura, na qual são citadas brevemente as pesquisas já realizadas relacionadas ao tema deste trabalho e os conceitos

necessários para compreensão deste estudo. No terceiro capítulo, encontram-se a metodologia e descrição dos materiais utilizados para o alcance dos objetivos apresentados no capítulo um. No quarto capítulo estão apresentados os resultados obtidos no estudo fotogramétrico, mapeamento de faces planares e análise de tensões por meio de simulação em elementos finitos. As considerações finais e sugestões para trabalhos futuros estão apresentadas no capítulo cinco. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização de maciços rochosos

Maciço rochoso é um material descontínuo, anisotrópico, não homogêneo e inelástico (HUDSON; HARRISON, 1997). Segundo Bieniawski (1989), este material deve ser tratado como um conjunto de blocos de rochas intactas, separados por descontinuidades geológicas. Deste modo, para análise de maciços rochosos, inicialmente se faz necessário estudar separadamente seus dois componentes: a rocha intacta e as descontinuidades.

De acordo com Hudson e Harrison (1997), define-se rocha intacta em termos de engenharia como “rocha que não contém fraturas significativas”. Dos diversos ensaios mecânicos utilizados para descrever o comportamento mecânico das rochas, o ensaio esclerômetro de Schmidt pode ser citado devido a sua simplicidade de execução.

O ensaio esclerômetro de Schmidt é realizado em campo, cujos valores de rebote do martelo fornece valores aproximados de resistência a compressão uniaxial e módulo de elasticidade de rochas. Este ensaio correlaciona a dureza superficial com a energia absorvida pela superfície do maciço durante o disparo de uma massa metálica (BRANDI; BARBOSA; GUIMARÃES, 2015). Como resultado, obtém-se o índice de dureza do material que pode ser utilizado para estimar a resistência a compressão uniaxial.

Considerado como um ensaio não destrutivo, o esclerômetro de Schmidt foi projetado inicialmente para ser utilizado em corpos de prova de concreto, entretanto, foi adaptado a fim de estimar a resistência a compressão uniaxial em rochas (RONAIB *et al.*, 2019). Segundo Brandi, Barbosa e Guimarães (2015) a utilização do esclerômetro de Schmidt em rochas é recente. Entretanto, pode-se citar alguns exemplos de utilização, como: avaliação da resistência geomecânica de cavidades subterrâneas (BRANDI; BARBOSA; GUIMARÃES, 2015), comparação entre ensaios uniaxial e esclerômetro (CARDOZO *et al.* 2016) e caracterização litoestrutural e geomecânica de cavidades (RONAIB *et al.*, 2019).

Brandi, Barbosa e Guimarães (2015) salientam a necessidade de posicionar o esclerômetro perpendicularmente à superfície a ser ensaiada, afim de evitar variações nos índices obtidos causadas pela ação gravitacional. Ao realizarem a comparação entre os ensaios de compressão uniaxial e martelo de Schmidt, Cardozo *et al.* (2016)

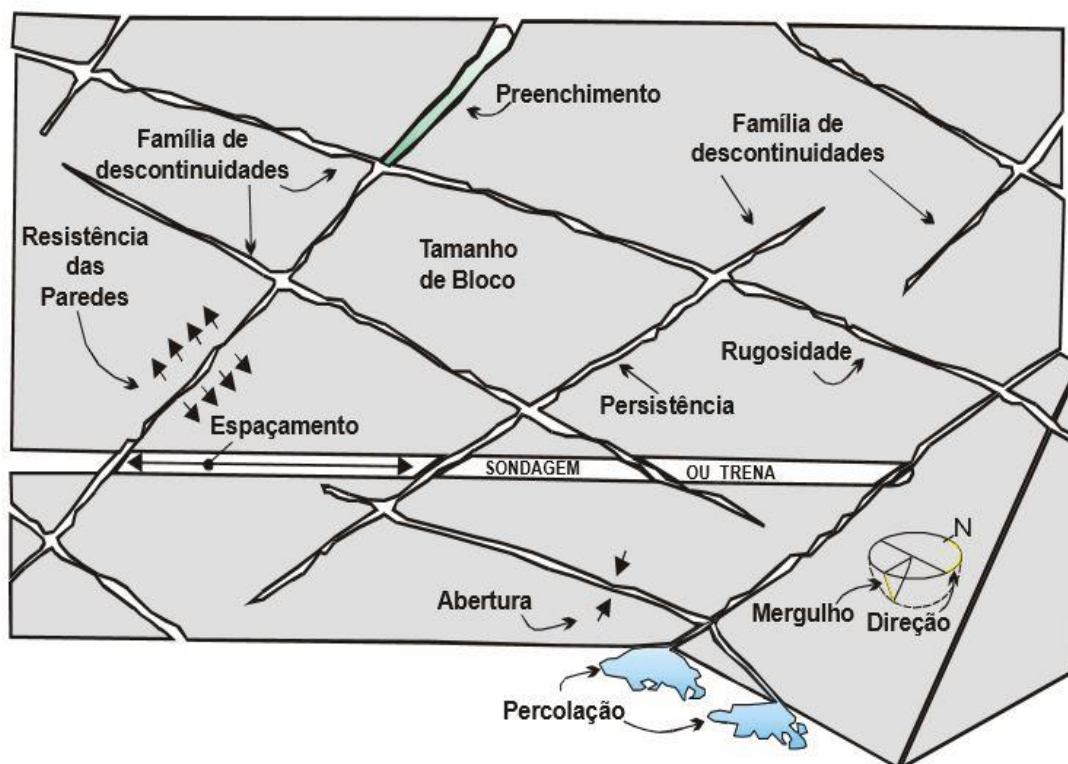
ressaltaram a concordância entre os valores obtidos para os dois ensaios, conferindo credibilidade quanto a utilização do esclerômetro para estimar a resistência a compressão uniaxial de maciços rochosos.

O material que compõe a rocha intacta é governado pelo processo básico de formação de rochas, que ao longo de milhões de anos é submetido a ação de intemperismos. Durante estes processos, as discontinuidades foram inseridas nas rochas por eventos geológicos, como resultados de diferentes estados de estresse (HUDSON; HARRISON, 1997).

Vallejo *et al.* (2002) define o termo discontinuidades como “qualquer plano de separação em um maciço rochoso”. Estas, podem ser denotadas coletivamente conforme seu processo de formação como: juntas, falhas, dobras, planos de acamamento e fraturas (HUDSON; HARRISON, 1997).

Segundo Hudson e Harrison (1997), as discontinuidades governam a deformabilidade, resistência e permeabilidade do maciço rochoso. Deste modo, na Figura 1 ilustra-se os principais parâmetros geométricos das discontinuidades.

Figura 1- Esquema das propriedades geométricas das discontinuidades.



Fonte: Adaptado de Hudson e Harrison (1997).

A seguir conceitua-se os principais parâmetros geométricos necessários para caracterização de maciços rochosos.

- Espaçamento e frequência: distância entre descontinuidades adjacentes, quando aferidas em uma mesma linha de medição. Já a frequência é o número de descontinuidades por unidade de distância (HUDSON; HARRISON, 1997). A determinação deste parâmetro define a dimensão dos blocos fragmentados do maciços (PAZ, 2015);
- Orientação: É a atitude de uma descontinuidade no espaço. É descrita pela direção do mergulho (azimute) e pelo ângulo entre a maior inclinação da descontinuidade e o plano horizontal (ISRM, 1978);
- Abertura: definida como a distância medida perpendicularmente entre paredes adjacentes de uma descontinuidade (HUDSON; HARRISON, 1997);
- Persistência: é a medida da extensão da descontinuidade em seu próprio plano (HUDSON; HARRISON, 1997);
- Rugosidade: São irregularidades e ondulações presentes nas superfícies das descontinuidades (HUDSON; HARRISON, 1997);
- Preenchimento: material que preenche o espaço entre as paredes das descontinuidades, podendo ser areia, argila, silte (ZHANG, 2005);
- Conjunto de descontinuidades: conjunto de descontinuidades paralelas ou subparalelas que ocorrem em zonas da rocha de menor resistência mecânica (ZHANG, 2005);
- Resistência das paredes: caracterizada pela resistência da interface entre a descontinuidade e maciço rochoso (ZHANG, 2005);
- Infiltração: o fluxo de água e a umidade livre visíveis nas descontinuidades individuais ou na massa rochosa como (ZHANG, 2005);
- Número de conjuntos: o número de conjuntos de descontinuidades que compreendem o sistema de descontinuidade em interseção (ZHANG, 2005);
- Tamanho do bloco: são determinados pelo espaçamento, persistência e número de conjuntos das descontinuidades (WYLLIE; MAH, 2004).

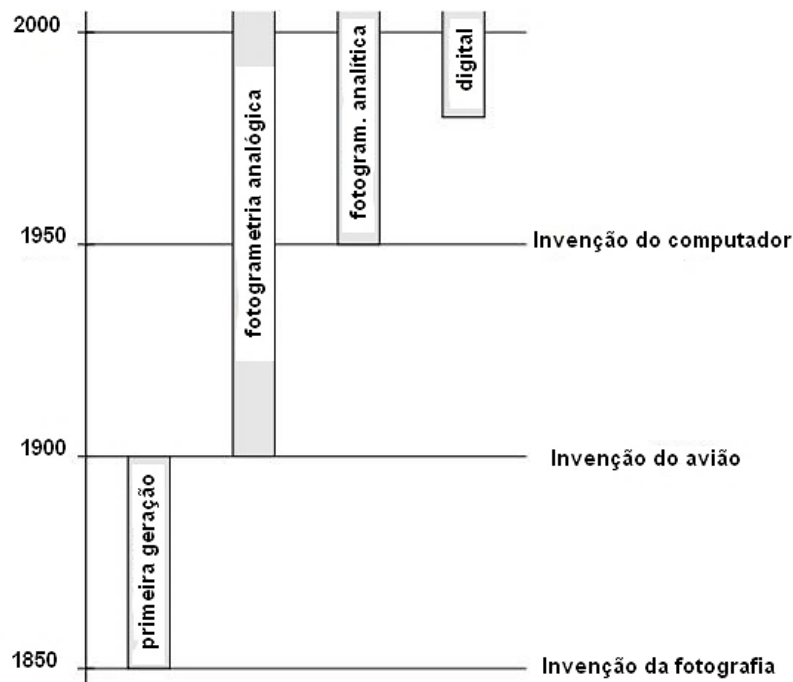
2.2 Fotogrametria

A fotogrametria pode ser entendida, de maneira geral, como “a ciência e tecnologia de se obter informações precisas por meio de imagens adquiridas por sensores” (COELHO; BRITO, 2007).

O uso da fotogrametria para fins de geotecnia data do início da década de 1960. Segundo Viana (2015) a técnica tornou-se limitada e pouco disseminada, devido ao processo de obtenção de dados ser oneroso. Nos últimos anos, entretanto, com o avanço da tecnologia relacionada a câmeras digitais, computadores e veículos aéreos não tripulados (VANTs), houve a simplificação na obtenção de imagens e seu posterior processamento.

Segundo Shenk (2005) as principais fases da fotogrametria estão ligadas com invenções tecnológicas, como a fotografia, aviões e computadores, como mostra a Figura 2. Este fato evidencia a dependência da fotogrametria em relação ao avanço tecnológico da ciência e tecnologia.

Figura 2- Principais fases da fotogrametria



Fonte: Adaptado de Shenk (2005).

Em 1841, Aimé Laussedat, conhecido como o “pai da fotogrametria”, desenvolveu os primeiros fundamentos e técnicas fotogramétricas através da compilação de mapas topográficos, constituindo assim o início da primeira fase da

fotogrametria, também conhecida como fotogrametria pioneira (COELHO; BRITO, 2007).

Coelho e Brito (2007) indicam que dois fatores impulsionaram a primeira evolução da fotogrametria, para a fase analógica: a invenção do estereocomparador por Carl Pullfrich e a criação do método de retificação de fotografias aéreas (Theodore Scheimpflug, em 1911). O estereocomparador tinha por objetivo substituir os cálculos matemáticos por métodos mecânicos, a fim de se obter informações das fotografias. Já o processo de retificação possibilita a geração de uma nova imagem sem distorções decorrentes do relevo. Com a criação desses instrumentos, Shenk (2005) ressalta a consolidação da fotogrametria como um método eficiente de mapeamento e levantamento de dados.

Simultaneamente a estas criações, Coelho e Brito (2007) salientam o surgimento das câmaras métricas, que imprimiam nas fotografias informações sobre seu sistema de coordenadas, agregando precisão às medidas.

A fase analítica da fotogrametria é marcada pelo surgimento dos computadores. Nesta fase, as informações obtidas de fotografias eram adquiridas de forma mecânica e depois transferidas para computadores (SANTOS, 2016). Coelho e Brito (2007) mencionam que os cálculos antes realizados por aparelhos analógicos foram substituídos pela resolução computacional de imagens, através de métodos matriciais. Em virtude disso, reduziu-se a utilização dos aparelhos analógicos, devido ao aumento da produtividade, precisão e sofisticação dos modelos.

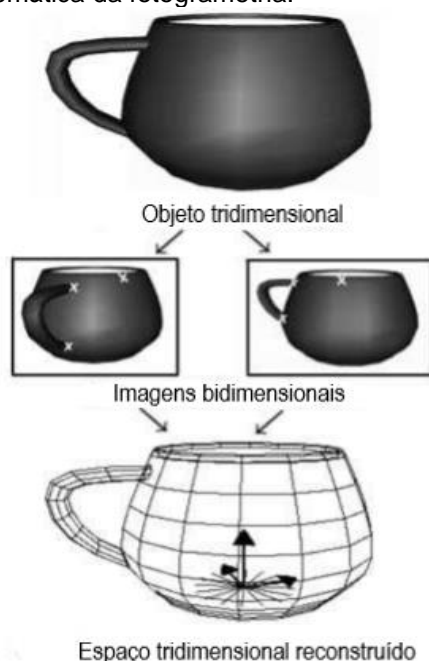
Já a era digital da fotogrametria caracteriza-se pela utilização de imagens digitais como principal fonte de dados, cuja obtenção pode ser diretamente de câmeras digitais ou através de imagens analógicas escaneadas, conforme citam Coelho e Brito (2007). Conseqüentemente, esta evolução permitiu simplificar e ampliar a utilização da fotogrametria para projetos de geometria complexa, além de reduzir custos e aumentar a precisão, quando comparado aos processos analógicos e analíticos (AMORIM et GROETELAARS, 2004 *apud* Yanaga, 2006).

2.2.1 Fotogrametria Digital

De acordo com Heipke (1995, *apud* TEMBA, 2000), a fotogrametria digital caracteriza-se como a tecnologia utilizada para obter parâmetros geométricos de um dado objeto, em ambiente tridimensional a partir de imagens digitais planas. Segundo

Spurr (1960 *apud* Fernandes, 2010), o espaço tridimensional é reconstruído devido ao fenômeno da visão estereoscópica, cuja formação se dá através da sobreposição de duas imagens bidimensionais fotografadas a partir de pontos diferentes. Este par de imagens é denominado par estereoscópico (Figura 3).

Figura 3- Representação esquemática da fotogrametria.



Fonte: Coelho e Brito (2007).

Coelho e Brito (2007) citam que o par de imagens adjacentes, necessita de uma sobreposição de pelo menos 60% lateralmente e 30% longitudinalmente, como mostra a Figura 4.

Figura 4- Sobreposição de imagens adjacentes.



Fonte: Coelho e Brito (2007).

A fototriangulação é definido por Coelho e Brito (2007) como “o processo de determinação de coordenadas do terreno dos pontos fotogramétricos selecionados sobre as imagens fotográficas”. Em virtude disso, visa estabelecer uma relação entre as imagens captadas, a câmera fotográfica e a posição do objeto em estudo. Esta relação permite determinar a localização espacial de um ponto no objeto

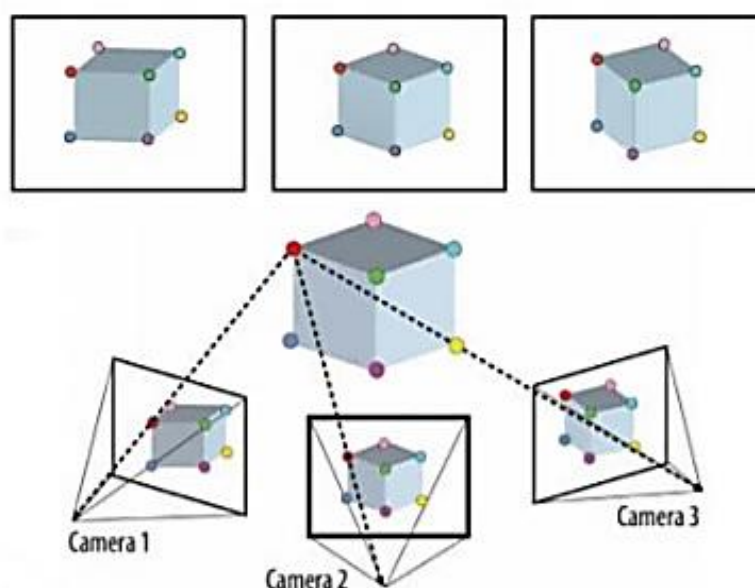
(FERNANDES, 2016). De acordo com SANTOS (2016), para orientar e posicionar as fotografias, é necessário que cada fotografia contenha pontos de coordenadas conhecidas, denominados pontos de controle.

2.2.2 Structure From Motion

O *Structure from Motion (SfM)*, traduzido livremente como “estrutura a partir do movimento”, é uma técnica de levantamento topográfico que surgiu dos avanços da visão computacional e da fotogrametria digital (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016).

Segundo Westoby *et al.* (2012), o *SfM* segue os mesmos princípios da fotogrametria digital, ou seja, utiliza a sobreposição de múltiplas imagens bidimensionais para a reconstrução do cenário tridimensional. Entretanto de acordo com Westoby *et al.* (2012), o *SfM* diferencia-se da fotogrametria devido a resolução automática da cena tridimensional, sem necessidade da especificação prévia de pontos de coordenadas conhecidas. No caso do *SfM*, para encontrar a correspondência entre as imagens, características como pontos com características notáveis, como bordas ou pontos que estejam cercados por texturas diferentes, precisam ser rastreadas de uma imagem para a outra (Figura 5) (VIANA, 2015; RODRIGUES, 2016). Estes recursos, de acordo com Snavely (2008, *apud* Westoby *et al.*, 2012) permitem estimativas de posições iniciais das câmeras e coordenadas do objeto, que posteriormente serão refinadas através de métodos iterativos.

Figura 5- Pontos notáveis

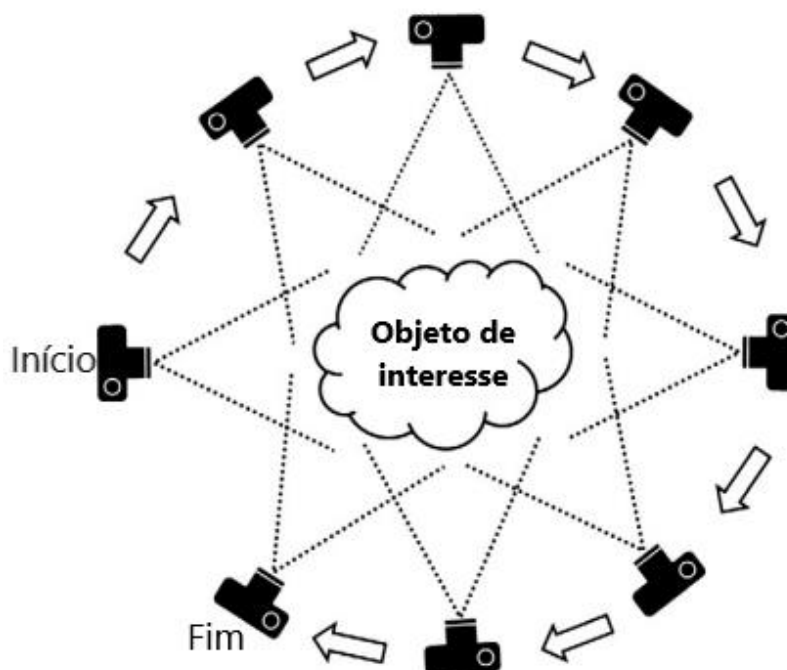


Fonte: Agarwal (2010 *apud* Rodrigues, 2016).

As imagens para reconstrução do cenário tridimensional podem ser adquiridas de frames de vídeos ou de várias imagens retiradas de diferentes posições (VIANA, 2015). Westoby *et al.* (2012) ressalta que para o melhor funcionamento do *SfM* e cobertura da geometria da cena, necessita-se de imagens com grandes áreas de sobreposição. Além disso, Carrivick, Smith e Quincey (2016) citam que as imagens devem ser adquiridas em torno da superfície de interesse, a fim de fornecer cobertura de 360° (Figura 6).

Bemis *et al.* (2014) salientam que para obter resultados satisfatórios e sem distorções, a aquisição das imagens em campo deve ser realizada em menos de trinta minutos, devido variação de luminosidade sobre a superfície.

Figura 6- Posicionamento das câmeras na aquisição de imagens.



Fonte: Adaptado de Westoby *et al.* (2012).

Para se obter um modelo tridimensional em escala, afim de extrair informações geométricas precisas do modelo, Carrivick, Smith e Quincey (2016) e Bemis *et al.* (2014) citam que basta conhecer a distância entre dois pontos conhecidos. Já para a obtenção de um modelo georreferenciado e com maior precisão, é recomendada a locação de no mínimo três pontos de controle distribuídos amplamente, variando em número de acordo com a necessidade de cobertura da área em estudo. Contudo,

não é exigido que estes pontos estejam visíveis em todas imagens adquiridas (CARRIVICK; SMITH ;QUINCEY, 2016; BEMIS *et al.*, 2014)

A reconstrução do espaço tridimensional através da fotogrametria digital aliada a *SfM* se dá através de *softwares* que variam de acordo com tipo de licença e produtos fotogramétricos obtidos.

Os avanços sucessivos no âmbito de imagens digitais e seu posterior processamento tornou a técnica da fotogrametria digital aliada a reconstrução tridimensional baseada em *SfM* uma ferramenta com aplicabilidade em diversas áreas de pesquisa, como: documentação patrimonial (PALERMO; LEITE, 2013; FERNANDES, 2016; MURTIYOSO; GRUSSENMEYER, 2017), mineração (TRINDADE *et al.*, 2015; PASETTO *et al.*, 2018), arqueologia (GREEN; BEVAN; SHAPLAND, 2014), regularização urbana (LINS, 2019), dimensionamento de rede de microdrenagem pluvial (VENTURINI, 2015) e monitoramento de áreas de preservação permanente (HOERLLE *et al.*, 2015).

2.2.3 Estudos de caso utilizando fotogrametria em maciços rochosos

No âmbito da caracterização de maciços rochosos, o conhecimento de características geométricas da rocha e das discontinuidades presentes é de suma importância. A obtenção de parâmetros das discontinuidades baseia-se tradicionalmente em mapeamentos de campo com bússola de geólogo e trena. Apesar de apresentar-se como uma técnica prática, sua utilização pode resultar em dados tendenciosos e imprecisos, já que dependem da habilidade e formação do engenheiro (VÖGE; LATO; DIEDERICHS, 2013).

Diante disso, a utilização da fotogrametria nas geociências mostra-se como uma alternativa útil e promissora quando comparada a métodos tradicionais de levantamento geométrico, principalmente em situações cuja superfície a ser caracterizada é de difícil acesso e obtenção de dados onerosa (COELHO, 2019).

Inseridos neste contexto, vários autores demonstraram a viabilidade da utilização da fotogrametria aliada a modelagem tridimensional para obtenção de características do maciço e de suas discontinuidades. Sturzenegger e Stead (2009), Westoby (2012), Vöge, Lato e Diederichs (2013) e Viana (2015) utilizaram as técnicas de varredura a laser e fotogrametria digital aliada a *Structure From Motion* para reconstrução virtual da topografia de diferentes maciços. Além disso, utilizaram a

técnica para levantamento automático de características de descontinuidades em rochas, através do desenvolvimento de rotinas computacionais e *softwares* especializados, para posterior comparação com o método tradicional. Os autores concluíram que a utilização de modelos tridimensionais gerados através da fotogrametria digital se mostra viável e confiável, mesmo para topografias complexas. Dentre as principais vantagens de sua utilização, os autores citam a facilidade, rapidez e baixo custo quanto à aquisição das imagens da técnica quando comparada varredura a laser.

Fernandes (2010) e Nóbrega *et al.* (2018) compararam as técnicas de mapeamento de descontinuidades através de modelos fotogramétricos com o método de levantamento manual de descontinuidades utilizando bússola de geólogo. Ambos autores consideram que a técnica fotogramétrica se mostra eficiente, já que permite coleta de dados em abrangência real e em locais inacessíveis.

Dewez *et al.* (2016) e Santos (2017) utilizaram a modelagem tridimensional de taludes em rocha, realizada através da fotogrametria digital para posterior extração automática de características de descontinuidades através do *software CloudCompare* com o *plug-in FACETS*, desenvolvido por Dewez *et al.* (2016). Em seu trabalho, Dewez *et al.* (2016) ainda comparou os resultados obtidos entre os dados extraídos automaticamente com os obtidos por levantamento manualmente em campo. Os resultados encontrados afirmam a viabilidade da metodologia, devido a similaridade com observações de campo.

2.3 Tensões e modelagem numérica em maciços rochosos

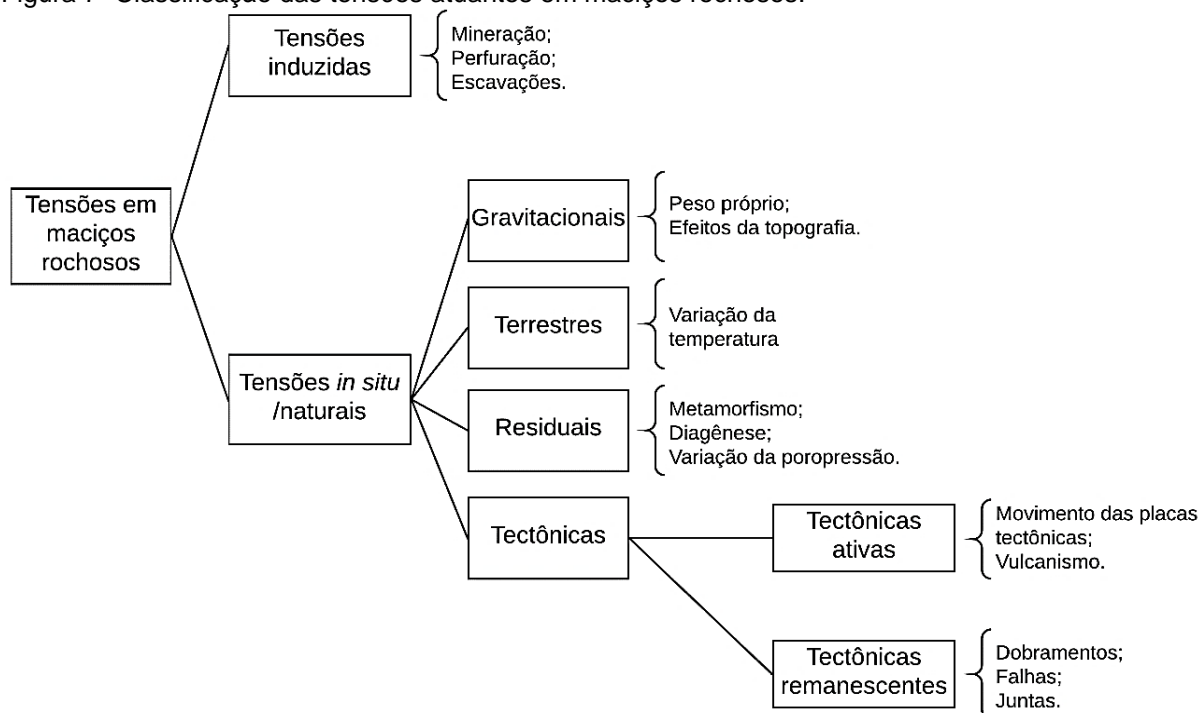
2.3.1 Tensões em maciços rochosos

A distribuição das tensões *in situ* de um maciço rochoso é consequência direta de sua história geológica, ou seja, de vários ciclos geológicos, físico-químicos, térmicos e mecânicos. Além disso, o caráter heterogêneo e descontínuo dos maciços rochosos impossibilita a determinação exata da distribuição das tensões e de suas direções *in situ* (AMADEI; STEPHANSSON, 1997; VALLEJO *et al.*, 2002).

Segundo Amadei e Stephansson (1997), as tensões atuantes em maciços rochosos podem ser classificadas de forma simplificada, como tensões induzidas (oriundas da intervenção humana) e tensões naturais, que se caracterizam como tensões existentes nas rochas antes de qualquer perturbação. Na Figura 7, pode ser

visualizada a classificação das tensões em maciços e seus respectivos exemplos, proposta por Amadei e Stephansson (1997).

Figura 7- Classificação das tensões atuantes em maciços rochosos.



Fonte: Adaptado de Amadei e Stephansson (1997).

Em se tratando de tensões gravitacionais, a magnitude depende diretamente do peso próprio do maciço, cuja determinação pode ser realizada de maneira simplificada, como o produto do peso específico e espessura da camada de rocha sobrejacente ao ponto analisado (VALLEJO *et al.*, 2002). Ainda, Vallejo *et al.* (2002) define as tensões terrestres como “tensões decorrentes da variação lenta da temperatura quando as rochas são impedidas de se contrair ou expandir”.

As tensões tectônicas são oriundas de processos geológicos ocorridos na crosta, como o movimento das placas tectônicas, vulcanismo, dobras, falhas e juntas (VALLEJO *et al.*, 2002). Já as tensões residuais são as remanescentes causadas pelos mecanismos de origem de formação dos maciços (VALLEJO *et al.*, 2002).

Devido a necessidade de determinar o estado de tensões em maciços em projetos de engenharia, diversos são os tipos de métodos para a obtenção do estado de tensões in situ, dentre eles, Armelin (2010) cita os principais tipos:

- Métodos hidráulicos;
- Métodos de alívio de tensões;
- Método do cancelamento dos deslocamentos;

- Método da recuperação das deformações;
- Método das análises de instabilidades em paredes de furos, entre outros.

Mesmo que existam vários métodos apontados pela literatura para a determinação da magnitude das tensões naturais e de suas orientações, cada método com suas respectivas vantagens e desvantagens, Amadei e Stephansson (1997) salientam que mesmo antes de utilizá-los para obter medição do estado de tensão com maior precisão, é necessário realizar uma estimativa deste campo de tensões, para que em uma etapa inicial de um projeto de engenharia possam ser definidos os melhores métodos de medição e além disso, determinar os locais mais solicitados para a realização destes ensaios. Ainda, segundo os autores, esta estimativa pode ser realizada de forma simples, através da tensão gravitacional ou até mesmo utilizando medições realizadas no passado na região a ser estudada.

Em casos de maciços de geometria complexa ou em locais de difícil acesso estas estimativas, que apesar de simples, podem tornar o processo dispendioso. Em função disso, o Método dos Elementos Finitos se torna uma ferramenta rápida de estimativa de tensões gravitacionais em maciços, necessitando-se apenas de propriedades de resistência e deformabilidade, que em se tratando de uma estimativa, podem ser determinados através de relações empíricas ou ensaios não-destrutivos, como o ensaio esclerômetro de Schmidt.

2.3.2 Modelagem numérica em maciços rochosos

Desenvolvido originalmente para análise de estruturas de aeronaves, o Método dos Elementos Finitos (MEF) possibilitou a resolução aproximada de problemas complexos de engenharia, ao passo que as ferramentas matemáticas existentes se mostraram limitadas (SINGIRESU, 2010).

O MEF consiste em subdividir o meio contínuo em vários pequenos elementos conectados por nós, para aproximar soluções de problemas descritos por equações diferenciais (SINGIRESU, 2010). No âmbito da mecânica das rochas, o desenvolvimento de computadores possibilitou a utilização do método devido a resolução automática das equações que representam o problema abordado (NIKOLIĆ; ROJE-BONACCI; IBRAHIMBEGOVIĆ, 2016).

De acordo com Jing e Hudson (2002), o MEF têm sido o método mais popular para a resolução de problemas complexos encontrados na área de mecânicas de

rochas, pois possibilita o manuseio de material heterogêneo, anisotrópico e de condições complexas. Com isso, pode-se citar alguns trabalhos relacionados a utilização do MEF em maciços rochosos.

Jing e Hudson (2002) e Jing (2003) apresentam uma completa revisão sobre a utilização de métodos numéricos aplicados a mecânica e engenharia de rochas. Jing e Hudson (2002) apresentam os métodos numéricos existentes e seus correlatos, além de citar problemas e possíveis avanços na modelagem numérica aplicada em mecânicas das rochas. Ao descrever os métodos existentes, os autores destacam as representações de fraturas no maciço.

Em seu trabalho Jing (2003) também discorre sobre os tipos de métodos numéricos, suas aplicações usuais, problemas e avanços. Entretanto, o autor aborda os conceitos de meios contínuos e descontínuos e fornece uma lista de métodos usualmente utilizados conforme o tipo de meio a ser simulado (contínuo, descontínuo e híbrido).

Pain, Kanungo e Sarkar (2014) adotaram duas abordagens diferentes de modelagem utilizando o Método dos Elementos Finitos para análise da estabilidade de taludes em maciços rochosos. Na primeira, os taludes são representados como um meio contínuo no qual o efeito das descontinuidades é inserido através da redução das propriedades de resistência da rocha intacta. Já na abordagem combinada de interface contínua, as descontinuidades são representadas por elementos de interface entre paredes de rocha.

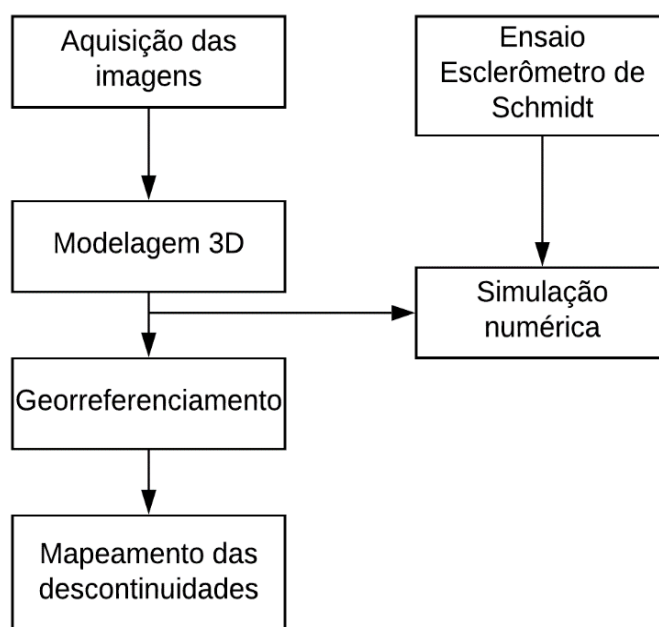
Jianping *et al.* (2015) aplicaram o MEF para estudar o comportamento mecânico de maciços rochosos fraturados. Os autores modelaram as fraturas do maciço como um elemento coesivo no *software ABAQUS*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 8 representa-se o fluxo de trabalho a ser seguido nesta pesquisa. Em campo, foram adquiridas as imagens e realizado o ensaio esclerômetro de Schmidt. Através de correlações com este ensaio estimou-se a resistência a compressão da rocha intacta.

Em ambiente computacional, realizou-se as seguintes etapas: modelagem tridimensional, georreferenciamento do modelo, mapeamento das descontinuidades e simulação numérica em elementos finitos.

Figura 8- Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte: Elaboração própria.

3.1 Objeto de estudo

A ponte natural de pedra (Figura 9) situada no Cerro do Negro, interior do município de Alegrete-RS, é considerada um ponto turístico da região. Sua formação é o resultado de processos erosivos ao longo de milhares de anos.

A região na qual está inserida enquadra-se no Grupo São Bento - Formação Botucatu, cuja área tem predominância de formações areníticas e apresenta coloração cinza-avermelhada com frequente presença de cimento silicoso ou ferruginoso (CPRM, 2008).

Figura 9- Ponte natural de Pedra



Fonte: Elaboração própria.

3.2 Estudo fotogramétrico

Neste trabalho o estudo fotogramétrico engloba todas as etapas necessárias para a obtenção de um modelo tridimensional realista da ponte de pedra, ou seja, desde a aquisição das imagens até o mapeamento das faces planares do maciço.

3.2.1 Aquisição das imagens

Nesta etapa, antes do início da aquisição das imagens, foram demarcados dois pontos de controle na superfície do objeto em estudo. A distância entre os pontos foi aferida com auxílio de trena, cuja medida foi utilizada para posterior calibração da escala do maciço na etapa de modelagem tridimensional.

Para a obtenção das imagens utilizou-se um veículo aéreo não tripulado (VANT) DJI Spark, com resolução de imagem de 12 megapixels e sistema de posicionamento por satélite GPS/GLONASS.

As imagens foram obtidas em uma ampla gama de posicionamentos em torno da ponte de pedra, com plano de voo definido previamente, de modo a oferecer o recobrimento total necessário para a reconstrução do cenário tridimensional. Além disso, o tempo para obtenção das imagens foi de cerca de 30 minutos como sugerido por Bemis *et al.* (2014), evitando dificuldades na reconstrução devido a variação de luminosidade e sombra.

3.2.2 Orientação do modelo

O georreferenciamento do modelo foi determinado através do sistema de posicionamento por satélite do VANT, que associou coordenadas geográficas para cada imagem obtida. Além disso, para estabelecer a orientação do modelo em relação a Norte magnético foi utilizada uma bússola geológica. Para tal, a bússola foi posicionada na largura média da ponte, no sentido do seu comprimento, aferindo-se a orientação em relação ao norte, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10- a) Posicionamento da bússola b) Orientação em relação ao Norte Magnético



a)



b)

Fonte: Elaboração própria.

A orientação obtida nesta etapa foi utilizada para orientar a nuvem de pontos processada no *software CloudCompare*, a fim de extrair a orientação das faces geológicas planares da ponte de pedra.

Através da utilização da bússola, obteve-se a orientação da ponte em relação ao norte para o mapeamento das descontinuidades. Utilizando-se a orientação obtida, nomeou-se as faces laterais como norte e sul, ilustradas anteriormente na Figura 9.

3.2.3 Modelagem tridimensional

A modelagem tridimensional da ponte de pedra foi realizada através do *software 3DFlow 3DFZephyr 5.008*, em sua modalidade de licença estudantil. Este *software*, baseado em *Structure from Motion*, proporciona a reconstrução inteiramente

automática de cenários tridimensionais a partir de diversas imagens, sem necessidade de equipamentos especializados.

Nesta etapa foram gerados os seguintes produtos: nuvem de pontos esparsa e densa, malha tridimensional simples e texturizada, modelo digital de elevação e ortofoto. Para a obtenção destes produtos fotogramétricos em escala, nesta etapa foram inseridas as distâncias entre os pontos de controle medidas em campo.

3.2.4 Mapeamento de faces planares geológicas

O mapeamento das discontinuidades foi realizado no *software* de código livre *CloudCompare*. As faces planares do maciço foram extraídas através do *plugin* de geologia estrutural *FACETS* seguindo a metodologia sugerida por Dewez *et al.* (2016).

Para mapear as faces planares do maciço, inicialmente foi importada a nuvem de pontos densa, obtida na etapa de modelagem tridimensional, para o *software* *CloudCompare*, no qual foi verificada a escala. Além disso, a orientação da nuvem de pontos em relação ao norte foi ajustada de forma manual.

Segundo Dewez *et al.* (2016), o método utilizado pelo *plugin* *FACETS* consiste basicamente em dividir uma nuvem de pontos em grupos de pontos que compartilham um grau de coplanaridade.

O fluxo de trabalho do *FACETS* consiste basicamente em três etapas. Inicialmente o *plugin* divide a nuvem de pontos densa em grupos de pontos que possuem grau de coplanaridade em comum, através de duas abordagens que utilizam o método dos mínimos quadrados: *Kd-Tree (KD)* e *Fast March (FM)*. Como resultado desta segmentação, formam-se pequenas faces coplanares. Já na segunda etapa, o *plugin* realiza o processo contrário, ou seja, as pequenas faces são agrupadas de acordo com o ângulo e distância máxima, ambos definidos pelo usuário, formando famílias e subfamílias de faces coplanares. Neste trabalho, foram utilizados os valores padrão do *plugin*, como sugere Dewez *et al.* (2016). A última etapa consiste em representar na forma de estereogramas, os planos que possuem a mesma orientação.

A fim de se avaliar as faces verticais norte e sul da ponte de pedra, a segmentação foi executada em uma seção retangular com 70 centímetros de altura, centralizada verticalmente nas faces da ponte e abrangendo a ponte em seu comprimento. As orientações das discontinuidades foram representadas através de estereogramas.

3.3 Caracterização dos materiais

Para caracterização mecânica da rocha intacta foi realizado o ensaio esclerômetro de Schmidt, a fim de se estimar o módulo de elasticidade (E) e resistência a compressão da rocha.

O coeficiente de Poisson e massa específica da rocha foram estimados com base em valores encontrados em Vallejo *et al.* (2002) para rochas sedimentares do tipo arenito, cujos valores são, respectivamente, 0,4 e 2,5 g/cm³.

3.3.1 Ensaio esclerômetro de Schmidt

O martelo de Schmidt é um aparelho portátil que pode ser utilizado em laboratório ou em campo, sendo capaz de fornecer uma avaliação rápida de dureza da rocha através da medição do índice esclerométrico.

Seguindo a normativa ASTM D 5873 (2014), inicialmente a mola do martelo é comprimida perpendicularmente a superfície ensaiada (Figura 11). O êmbolo deverá ser pressionado gradualmente até que o martelo seja acionado e o impacto ocorra.

Figura 11- Ensaio esclerômetro de Schimidt.



Fonte: Elaboração própria.

Durante o ensaio foram registradas as alturas de rebote do êmbolo até o número inteiro mais próximo, antes de restaurar o pistão à sua extensão original. Repetiu-se o ensaio em 20 locais diferentes, buscando melhor representatividade do maciço rochoso, espaçados em pelo menos um diâmetro do pistão do martelo.

3.3.2 Módulo de elasticidade

Para estimar o módulo de elasticidade (E) a partir do ensaio esclerômetro de Schmidt foi utilizada a metodologia empregada por Katz, Reches e Roegiers (2000), cuja correlação se dá através da Equação 1, apresentada abaixo.

$$\ln(E) = -8.967 + 3.091 * \ln(HR) \pm 0.101 \quad (1)$$

Onde:

E= Módulo de elasticidade, em GPa;

HR= Altura de rebote do martelo.

Na Tabela 1 estão apresentados, para cada local ensaiado, os módulos de elasticidade obtidos através da correlação da Equação 1.

Tabela 1- Módulo de elasticidade

Amostra	HR	Módulo de elasticidade, E (GPa)
1	42	13,28
2	40	11,42
3	50	22,76
4	44	15,33
5	49	21,38
6	39	10,56
7	38	9,75
8	48	20,06
9	32	5,73
10	46	17,59
11	34	6,91
12	28	3,79
13	45	16,43
14	44	15,33
15	27	3,39
16	42	13,28
17	31	5,19
18	29	4,23
19	40	11,42
20	31	5,19

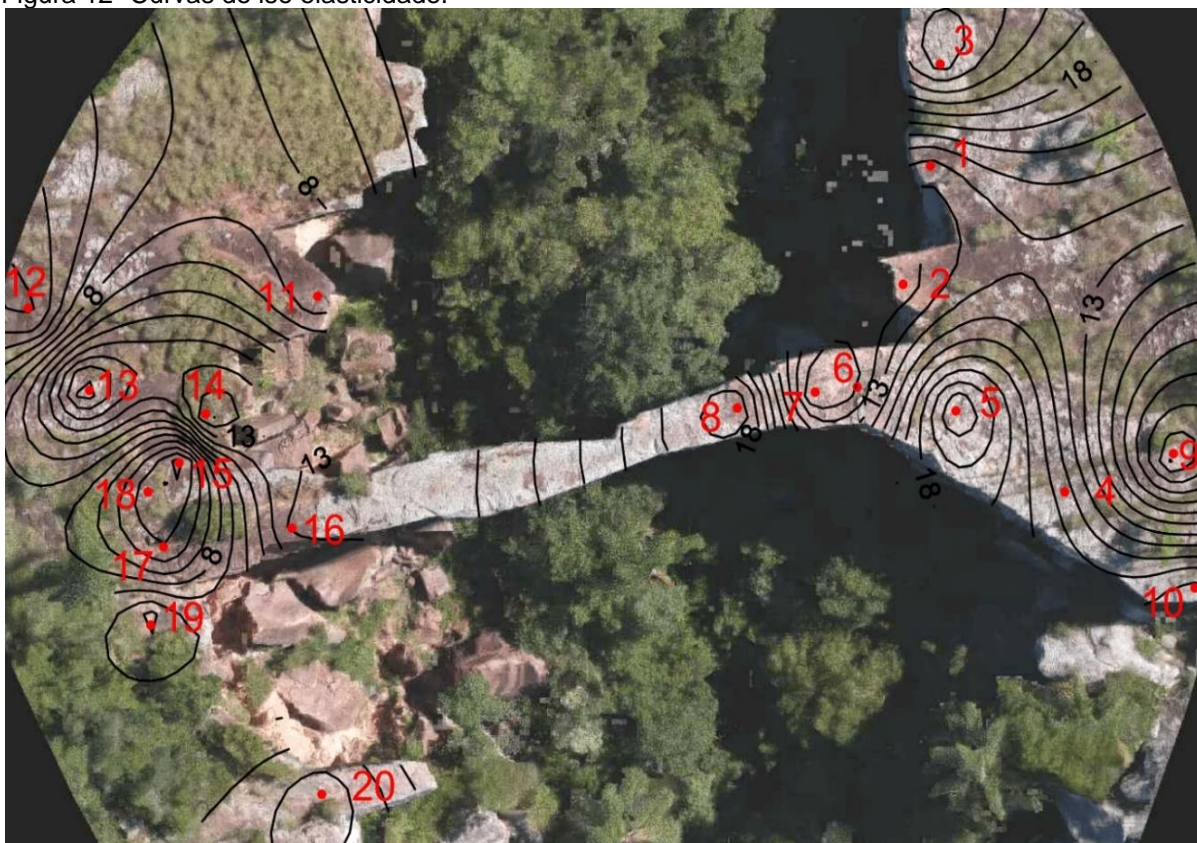
Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Vallejo *et al.* (2002), os valores referência máximos e mínimos do módulo de elasticidade para rochas areníticas são, respectivamente: 2,9 e 59,8 GPa. Observando a Tabela 1, nota-se que os valores de módulos de elasticidade

obtidos para os 20 locais ensaiados estão entre os limites apresentados pelos autores.

Os pontos de realização do ensaio estão identificados na ortofoto gerada através *software 3DF Zephyr*. A partir dos resultados, foram geradas curvas de iso elasticidade com o *software Surfer*, as quais estão ilustradas na Figura 12.

Figura 12- Curvas de iso elasticidade.



Fonte: Elaboração própria.

A análise das curvas de iso elasticidade aponta a variação dos módulos de elasticidade em diferentes regiões do maciço. Esta variação deve-se a diversos fatores, como: grau de anisotropia, presença de descontinuidades e porosidade (VALLEJO *et al.*, 2002).

3.3.3 Resistência a compressão

Para estimar a resistência a compressão (σ_c) foram empregadas duas relações distintas, apresentadas em Vallejo *et al.* (2002) e O'Rourke (1989, *apud* Ávila, 2012). O'Rourke (1989, *apud* Ávila, 2012) relaciona a resistência a compressão de rochas areníticas com a altura de rebote do martelo de Schmidt (Equação 2).

$$\sigma_c = 702HR - 11040 \quad (2)$$

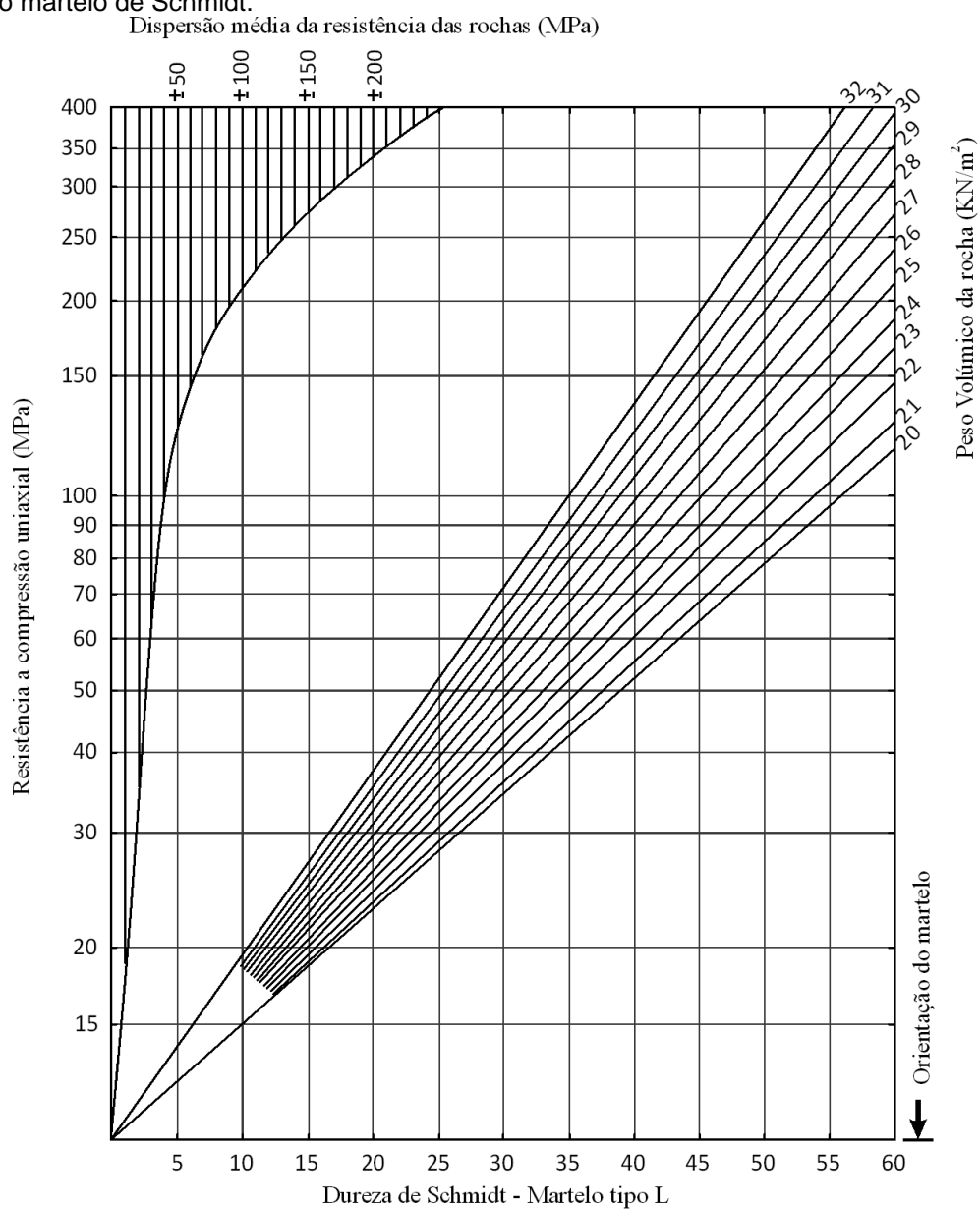
Onde:

σ_c = Resistência a compressão, em Psi;

HR= Altura de rebote do martelo.

Já Vallejo *et al.* (2002) estima a resistência a compressão relacionando a altura de rebote do martelo e massa específica da rocha através do ábaco, apresentado na Figura 13.

Figura 13- Ábaco de Miller para determinação da resistência a compressão através da altura de rebote do martelo de Schmidt.



Fonte: Adaptado de Vallejo *et al.* (2002).

Na Tabela 2 estão apresentadas as estimativas de resistência à compressão utilizando duas correlações diferentes apresentadas em: O'Rourke (1989) e Vallejo *et al.* (2002).

Tabela 2- Estimativas de resistência à compressão.

Amostra	HR	Resistência à compressão (MPa)	
		O'Rourke (1989, <i>apud</i> Ávila, 2012).	Vallejo <i>et al.</i> (2002)
1	42	127,17	85
2	40	117,49	78
3	50	165,89	130
4	44	136,85	93
5	49	161,05	125
6	39	112,65	72
7	38	107,81	70
8	48	156,21	120
9	32	78,77	50
10	46	146,53	102
11	34	88,45	59
12	28	59,41	43
13	45	141,69	98
14	44	136,85	93
15	27	54,57	41
16	42	127,17	85
17	31	73,93	49
18	29	64,25	44
19	40	117,49	78
20	31	73,93	49

Fonte: Elaboração própria.

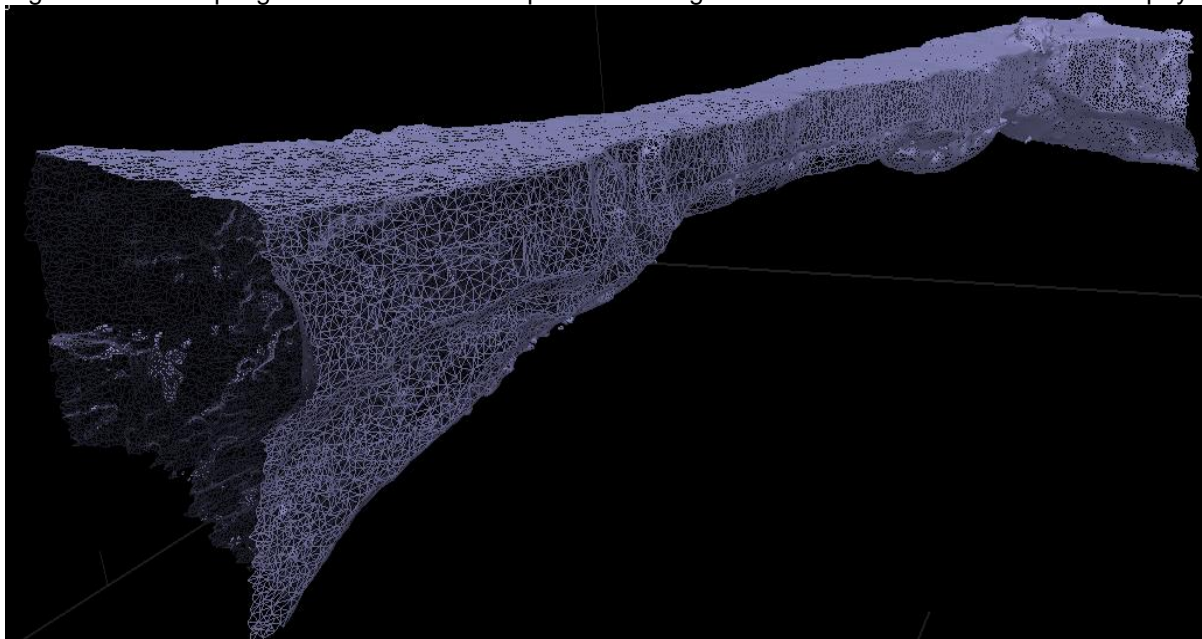
A partir dos valores obtidos para as duas correlações utilizadas, mesmo que ambos autores relacionem a resistência a compressão com a altura de rebote, nota-se grande discrepância entre os resultados, com variação até 44 MPa. Tal fato deve-se a utilização de métodos diferentes pelos autores. O'Rourke (1989, *apud* Ávila, 2012) utiliza uma equação específica para arenitos. Já Vallejo *et al.* (2002) utiliza um ábaco sem especificação de tipos de rochas, porém relaciona a resistência a compressão com a massa específica da rocha.

3.4 Simulação numérica

Para estimar a distribuição de tensões principais na ponte de pedra, foi utilizado o *software* de elementos finitos *ABAQUS*. Neste trabalho, a estimativa destas tensões foi realizada considerando apenas a ação da força gravitacional no maciço.

Na Figura 14 está representada a malha poligonal resultante da modelagem tridimensional da ponte de pedra através do *software 3DFZephyr*.

Figura 14- Malha poligonal resultante da etapa de modelagem tridimensional no software 3DFZephyr.

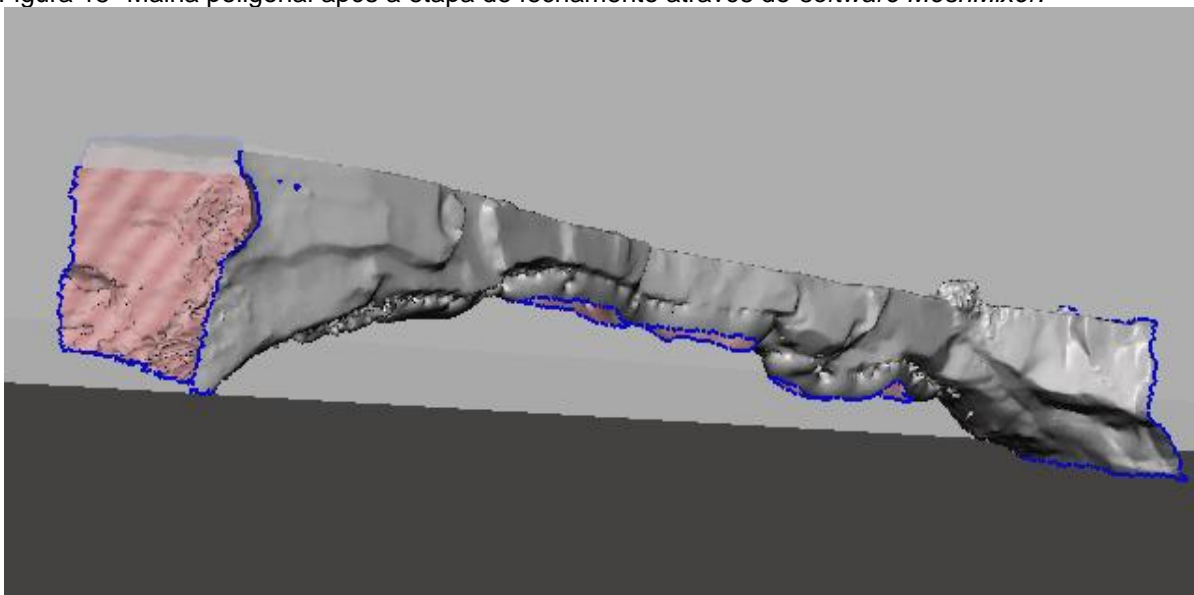


Fonte: Elaboração própria.

Observando a Figura 14, nota-se que a malha gerada contém aberturas nas regiões dos apoios devido a remoção do maciço nestes locais. Além disso, observa-se que a malha é composta de muitos polígonos e possui forma de casco. Devido a estas características, foi necessário realizar três modificações na malha utilizando três *softwares* distintos, para posterior importação para o *software ABAQUS*. Estas etapas são divididas entre fechamento, simplificação e solidificação da malha poligonal.

A etapa de fechamento da malha poligonal foi realizada através do *software MeshMixer*. Na Figura 15, está representada a malha poligonal após a etapa de fechamento, cuja representação se dá através das regiões delimitadas pela linha em azul.

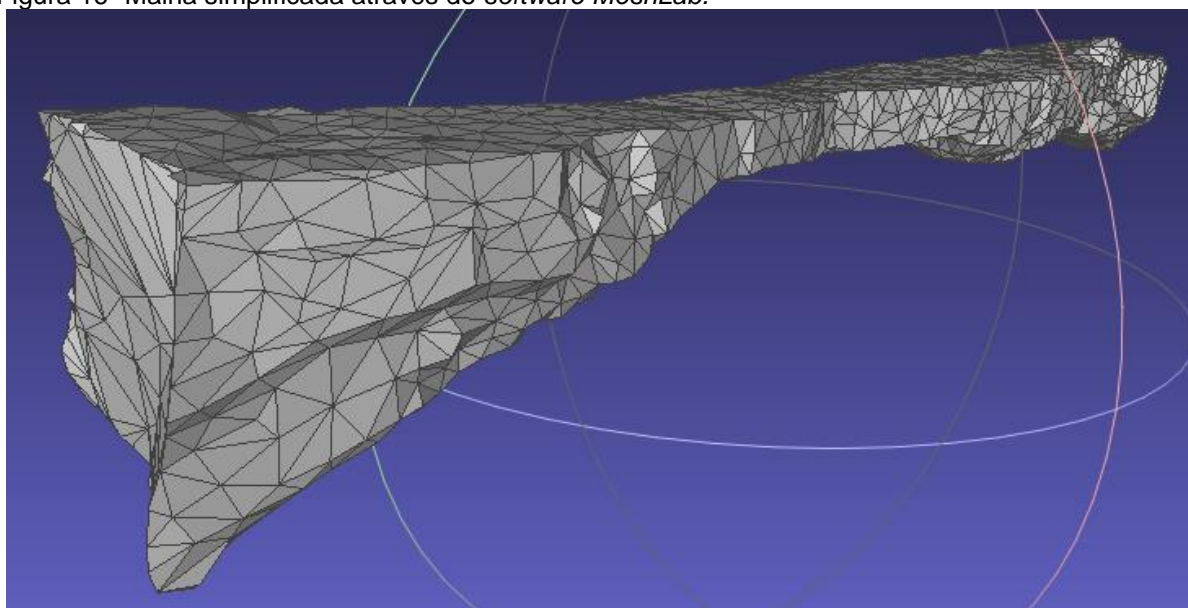
Figura 15- Malha poligonal após a etapa de fechamento através do *software MeshMixer*.



Fonte: Elaboração própria.

Após a etapa de fechamento da malha, foi realizada a simplificação do modelo tridimensional através do *software MeshLab*, pois a geração do modelo tridimensional por fotogrametria gera um modelo com uma quantidade de polígonos que o torna computacionalmente pesado para simulação numérica, tornando muito lento o processo de simulação. O resultado desta etapa está representado na Figura 16.

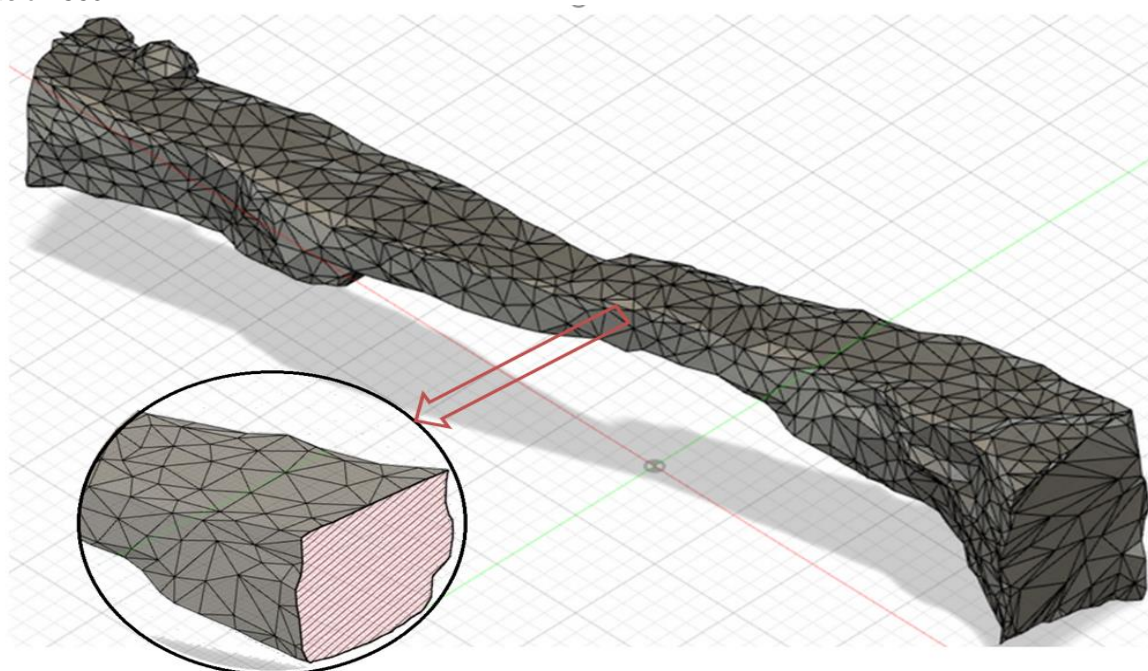
Figura 16- Malha simplificada através do *software MeshLab*.



Fonte: Elaboração própria.

A terceira etapa consiste na solidificação do modelo tridimensional, já que o modelo fotogramétrico gerado é um modelo poligonal de casco, e para a importação do modelo para o software ABAQUS é necessário um modelo tipo sólido. Para esta etapa o software utilizado foi o Autodesk Fusion 360. Na Figura 17 está representada a malha tridimensional após a etapa de solidificação, representada no detalhe da seção da ponte pela hachura.

Figura 17- Malha tridimensional após a etapa de solidificação realizada através do software Autodesk Fusion 360.



Fonte: Elaboração própria.

Após a realização das etapas de modificação da malha mostradas anteriormente, foi realizada uma análise de malha de elementos finitos, para estudo de convergência. Quatro refinamentos da malha foram testados, permitindo analisar a precisão e variabilidade dos resultados obtidos. Para cada um dos quatro modelos refinados, foram verificados os valores da deformação vertical no centro da ponte e as tensões máximas e mínimas principais.

A massa específica e coeficiente de Poisson foram determinados empiricamente através de valores encontrados na literatura para rochas do tipo arenito. O módulo de elasticidade foi estimado a partir da média aritmética dos 20 ensaios de esclerometria *in loco*. Na Tabela 3 estão apresentados os valores e unidades das propriedades do maciço utilizados nos refinamentos da malha.

Tabela 3- Valores utilizados nos refinamentos da malha.

Propriedade	Valor adotado
Módulo de elasticidade (E)	11651,53 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,4
Massa específica (ρ)	2500 Kg/m ³

Fonte: Elaboração própria.

A fim de comparação, foram simulados dois modelos numéricos com diferentes módulos de elasticidade com valores que representam o máximo e o mínimo obtidos. Estes foram definidos a partir da análise dos módulos de elasticidade encontrados na ponte de pedra, apresentados anteriormente na Tabela 1. Os valores máximos e mínimos foram encontrados ao delimitar apenas a ponte de pedra, sem considerar a influência dos módulos de elasticidade do maciço de apoio, ou seja, apenas as amostras 6, 7, 8 e 16 foram consideradas na análise. A partir destas amostras foram definidos os módulos de elasticidade máximo e mínimo, cujos valores são, respectivamente, $9,75 \times 10^9$ e $20,06 \times 10^9$ Pa. Ainda, nestes modelos foram utilizados os mesmos valores de massa específica e coeficiente de Poisson observados na Tabela 3.

4. RESULTADOS

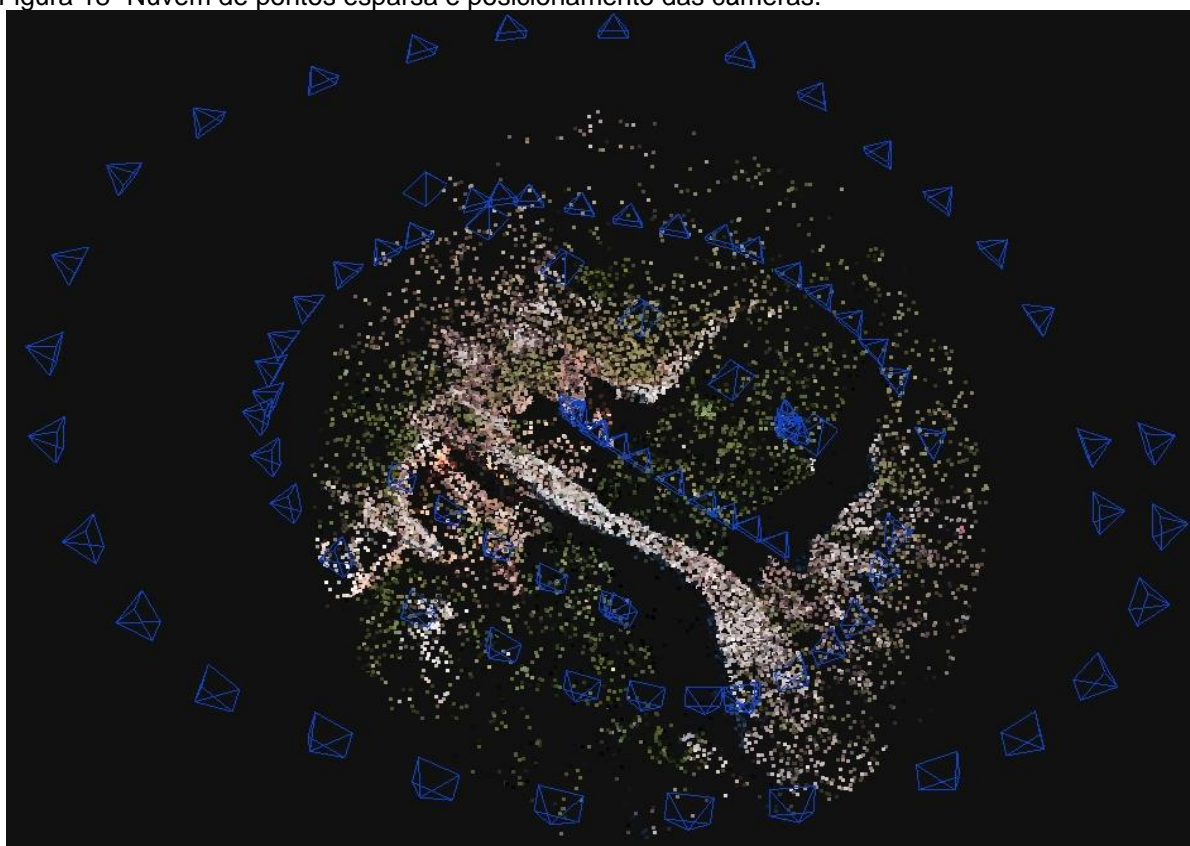
4.1 Modelagem tridimensional

Neste item estão apresentados os resultados obtidos para o estudo fotogramétrico da ponte de pedra, realizado no *software 3DFlow 3DFZephyr 5.008*.

Na etapa de aquisição dos dados em campo, foram obtidas cerca de 104 imagens para a geração do modelo tridimensional.

O alinhamento das imagens é a primeira etapa da reconstrução do modelo tridimensional. Este processo é responsável por definir automaticamente a posição e orientação de cada foto, cujo resultado é a nuvem de pontos esparsa. Após esta etapa, 97 imagens foram selecionadas pelo *software* para a geração do modelo. Na Figura 18 está apresentada a nuvem de pontos esparsa juntamente com a posição de cada imagem obtida, representada pelos polígonos em azul.

Figura 18- Nuvem de pontos esparsa e posicionamento das câmeras.



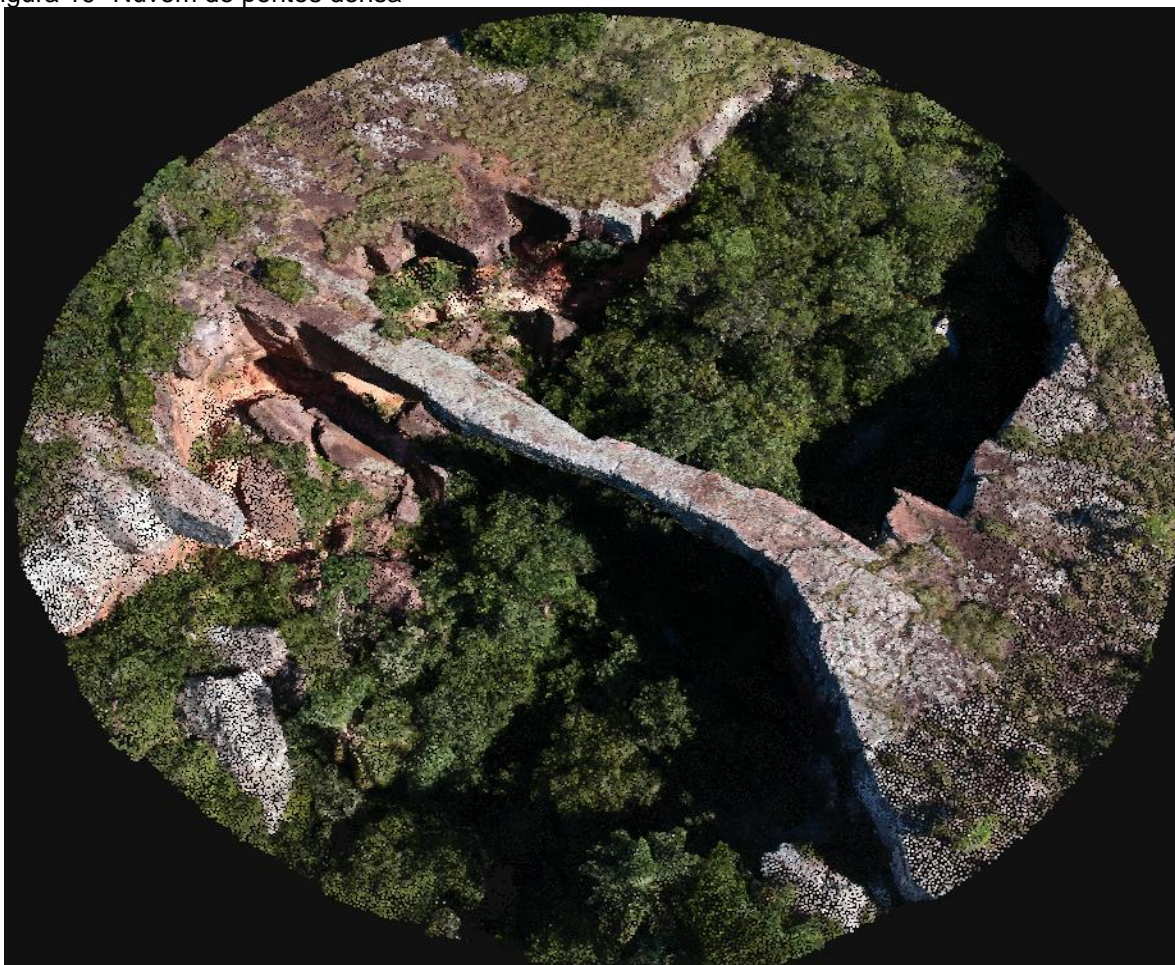
Fonte: Elaboração própria.

Ao observar a Figura 18, nota-se a ampla faixa de posicionamentos da câmera na etapa de aquisição das imagens, como recomendado por Carrivick, Smith e Quincey (2016) e Westoby *et al.* (2012).

Com o intuito de diminuir o tempo de processamento dos dados, a nuvem esparsa foi delimitada no formato de elipse. Com isso, os próximos produtos obtidos terão a mesma característica.

Na etapa seguinte foi realizada a densificação dos pontos reconhecidos no alinhamento das imagens, ilustrada na Figura 19. A comparação da nuvem de pontos esparsa e densa ilustra o maior detalhamento do modelo tridimensional.

Figura 19- Nuvem de pontos densa

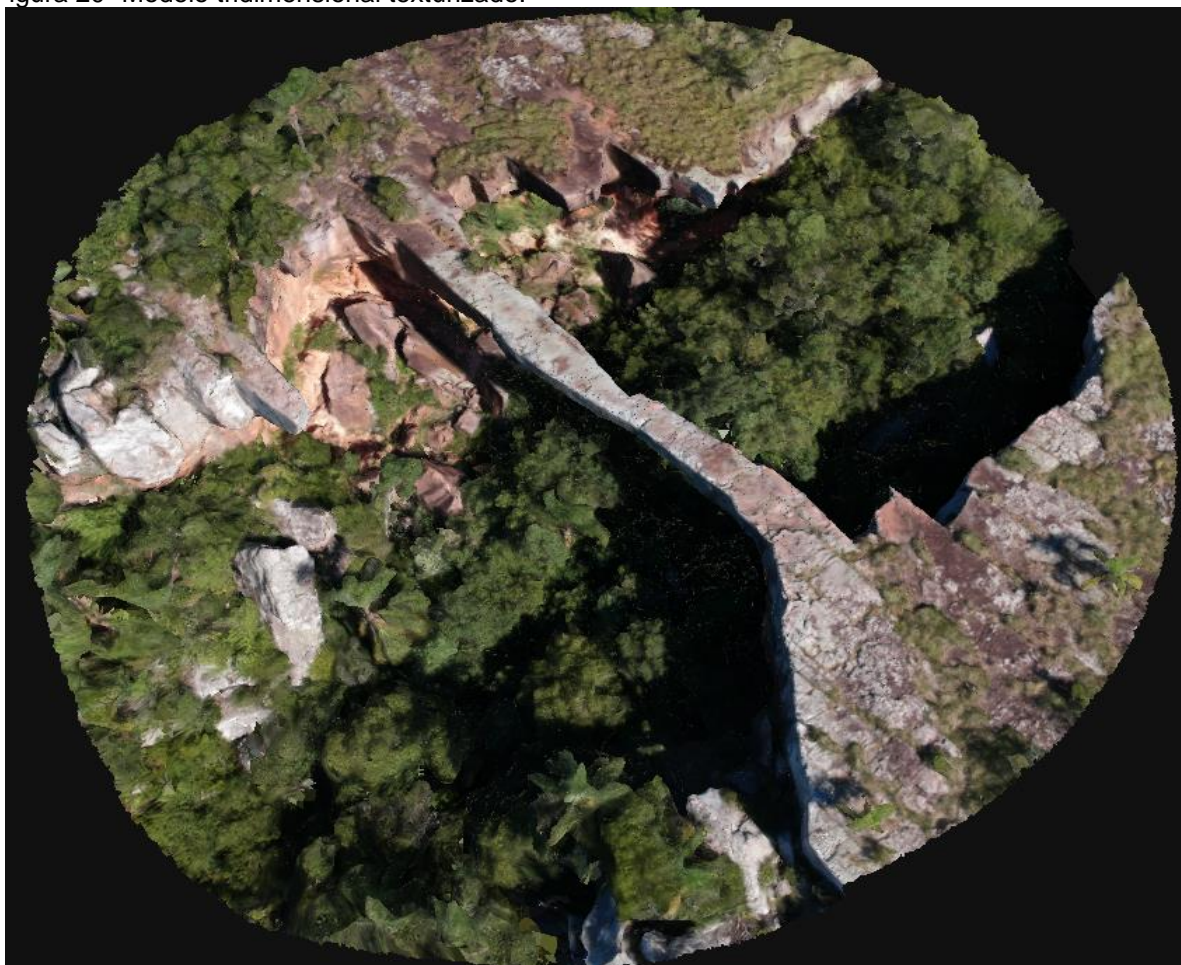


Fonte: Elaboração própria.

A reconstrução do modelo tridimensional é realizada através da transformação da nuvem de pontos densa em uma superfície, representada por malhas simples e texturizadas.

Na Figura 20 está ilustrado o modelo tridimensional texturizado da ponte natural pedra. Ao analisar a imagem abaixo, nota-se a semelhança com o maciço real, apresentada na Figura 9.

Figura 20- Modelo tridimensional texturizado.



Fonte: Elaboração própria.

Devido a semelhança obtida, o modelo tridimensional proporciona o registro permanente do maciço em estudo e monitoramento de processos erosivos ocorridos ao longo dos anos.

Além disso, através da modelagem tridimensional podem ser gerados modelos acurados, de baixo custo e que auxiliam a obtenção de informações do maciço como: mapeamento, orientação e espaçamento das discontinuidades (DEWEZ *et al.*, 2016; SANTOS, 2017).

Por fim, os últimos modelos gerados foram o ortomosaico e o modelo digital de elevação (MDE). O modelo ortomosaico, ilustrado na Figura 21, é obtido a partir do processo de ortoretificação do modelo tridimensional, ou seja, sem efeitos de perspectiva.

Figura 21- Ortofoto.

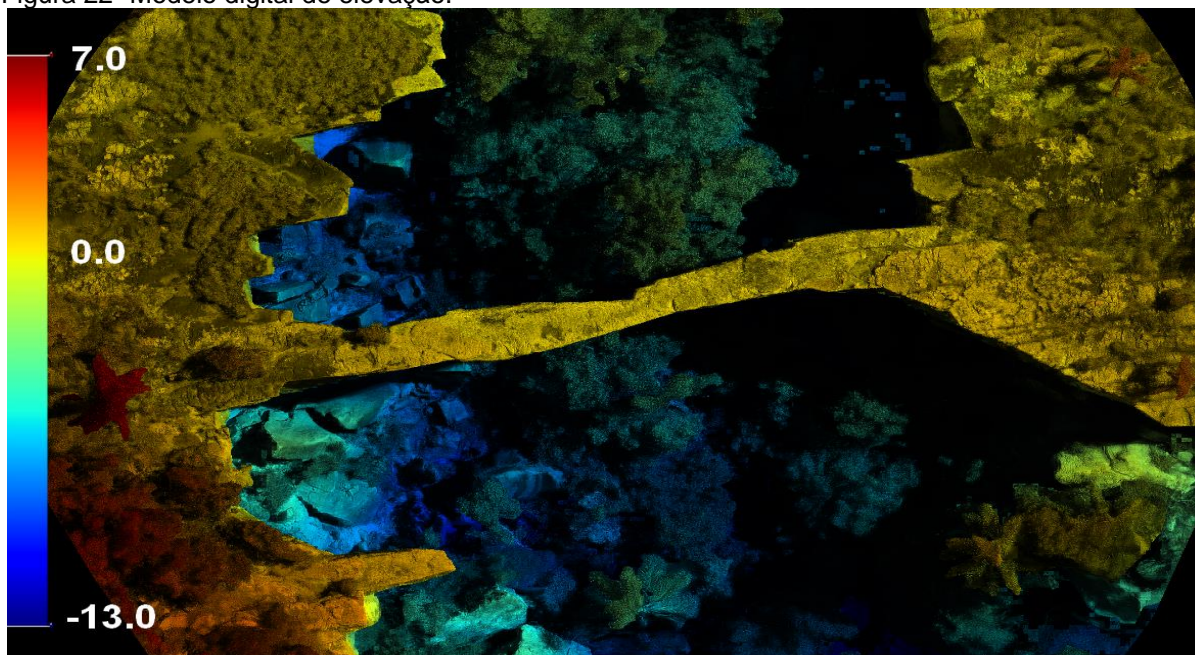


Fonte: Elaboração própria.

Segundo Bemis *et al.*(2014), o ortomosaico é útil para o mapeamento de afloramentos e faces de rochas, na geologia estrutural. Além disso, pode ser utilizado para fins cartográficos, no qual permite a medição de distâncias verdadeiras, sem os defeitos causados pelo relevo (BEMIS *et al.*, 2014)

Na Figura 22 observa-se o modelo digital de elevação (MDE) da área em estudo, com as elevações representadas em escala de cores. Este modelo pode ser utilizado para detecção e monitoramento da mudança de uma superfície topográfica.

Figura 22- Modelo digital de elevação.



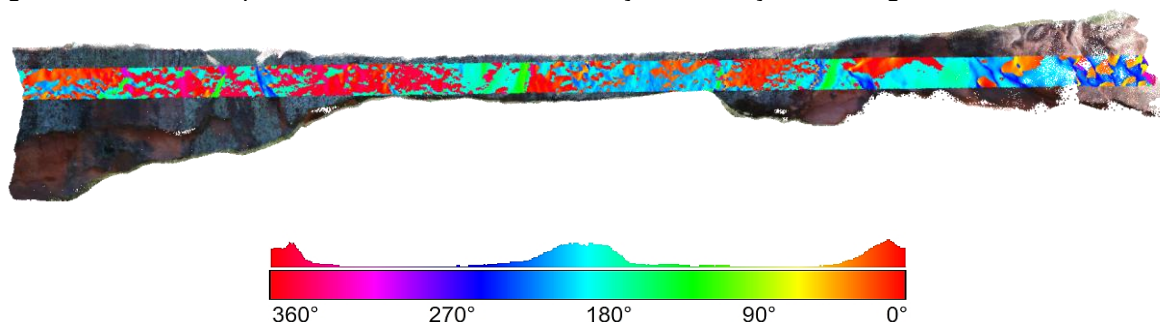
Fonte: Elaboração própria.

O MDE representa as altitudes da área, incluindo os elementos acima do terreno, como vegetação e afloramentos de rochas. Observando a Figura 22 pode-se notar que as altitudes variam entre -13 a 7 metros em relação a ponte de pedra, sendo as altitudes positivas referentes a presença de outros maciços e árvores no local.

4.2 Mapeamento das faces geológicas planares

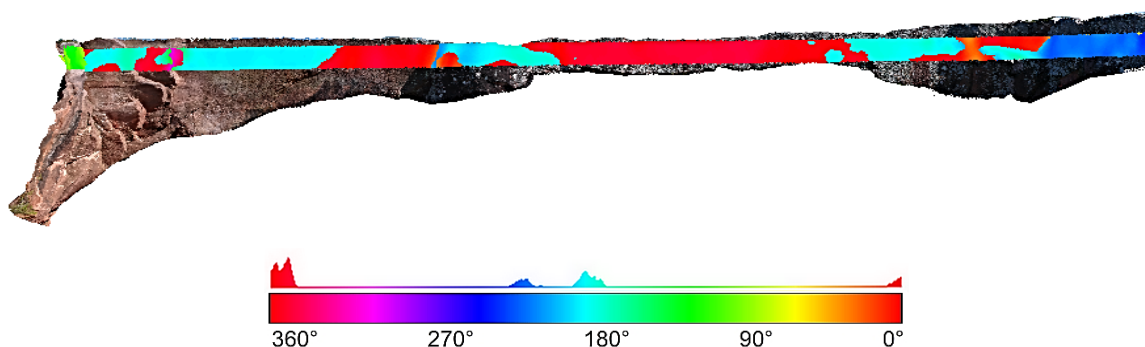
Nas Figuras 23 e 24 estão apresentadas as nuvens de pontos das laterais norte e sul da ponte, respectivamente, onde é possível observar a faixa central, cuja escala de cores representa a direção do mergulho de cada ponto da nuvem de pontos. É possível observar a quantidade de pontos que se enquadram na direção de mergulho referente a coloração indicada por meio do gráfico de colunas acima da legenda. Pode-se observar que as direções dominantes dos mergulhos são orientadas no sentido Norte e Sul (0° e 180°).

Figura 23- Nuvem de pontos da face norte com indicação da direção de mergulho.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 24- Nuvem de pontos da face sul com indicação da direção de mergulho.

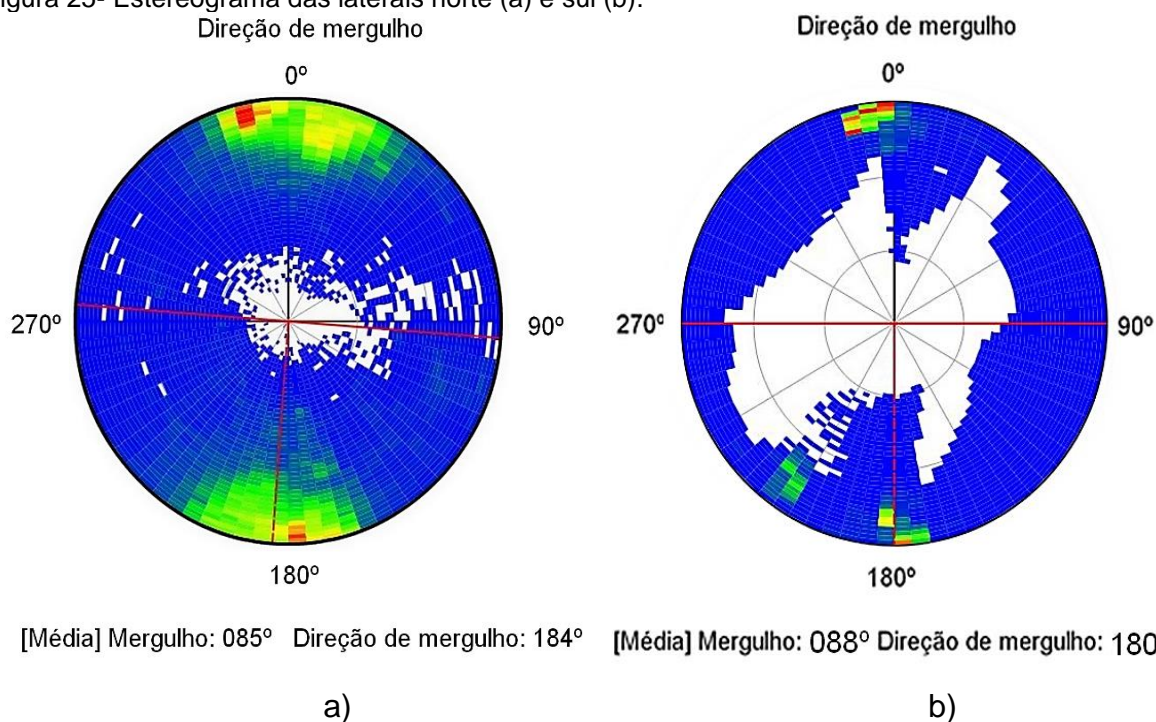


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 25 estão ilustrados dois estereogramas: o primeiro para a lateral norte (Figura 25a) e o segundo para a lateral sul (Figura 25b). Indicados pela densidade de pólos nos estereogramas, para a face norte e sul observa-se que as principais direções de mergulho são no sentido norte e sul. Porém para a lateral sul, nota-se um pequeno grupo isolado de faces com direções de mergulho de 225°

Ainda, é possível verificar que ambas faces apresentam dispersão de direções de mergulho, com variação de até 50°. Ademais, os mergulhos são predominantemente de 80 a 90° para ambas faces, indicando constante verticalidade das descontinuidades nesta face.

Figura 25- Estereograma das laterais norte (a) e sul (b).



Fonte: Elaboração própria.

Em se tratando das segmentações pelos algoritmos *Kd* e *Fm*, pode-se observar na Tabela 4 que os mergulhos médios obtidos se mostraram muito semelhantes, aproximadamente 90° para as faces norte e sul. As direções médias de mergulho para as faces norte e sul são de 170° a 190°, para as segmentações *Kd* e *Fm*.

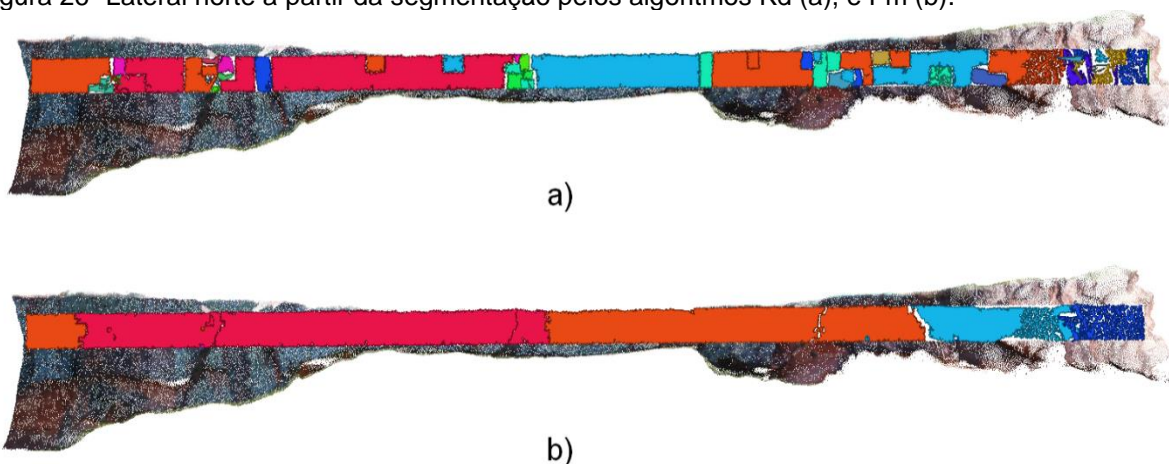
Tabela 4- Valores médios de mergulho e direção de mergulho obtidos pela segmentação pelos algoritmos KD e FM.

Face	Kd		Fm	
	Mergulho	Dir. de mergulho	Mergulho	Dir. de mergulho
Norte	89°	188°	89°	188°
Sul	89°	175°	88°	176°

Fonte: Elaboração própria.

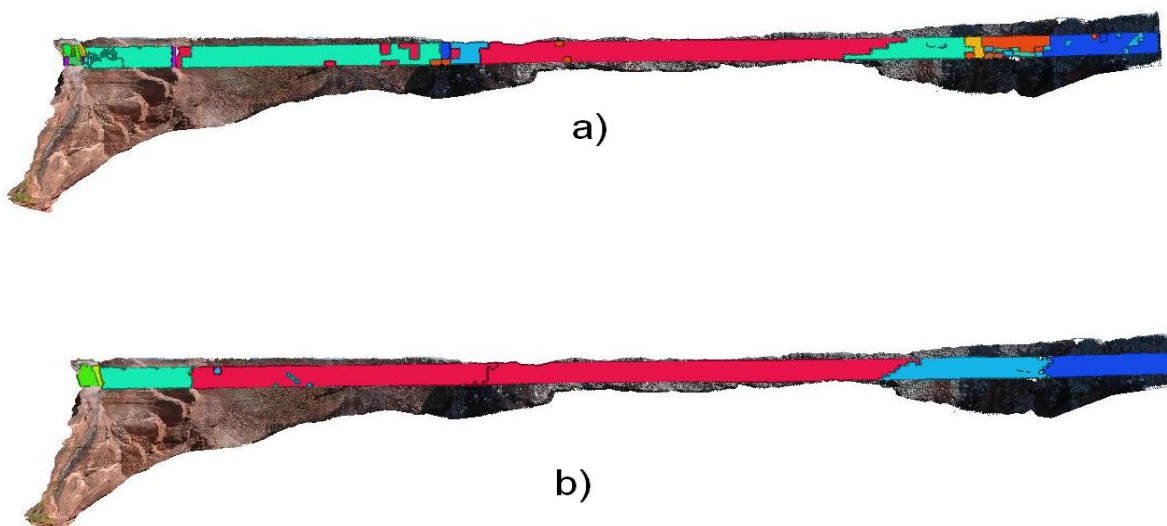
As famílias de faces planares geradas a partir das segmentações pelos algoritmos *Kd* e *Fm* para as faces norte e sul podem ser observadas, respectivamente, nas Figuras 26 e 27.

Figura 26- Lateral norte a partir da segmentação pelos algoritmos Kd (a), e Fm (b).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 27- Lateral sul a partir da segmentação pelos algoritmos Kd (a), e Fm (b).



Fonte: Elaboração própria.

As figuras 26 e 27 representam os resultados obtidos para o agrupamento das famílias de faces coplanares, para ambos algoritmos de segmentação: *Kd* e *Fm*. Os

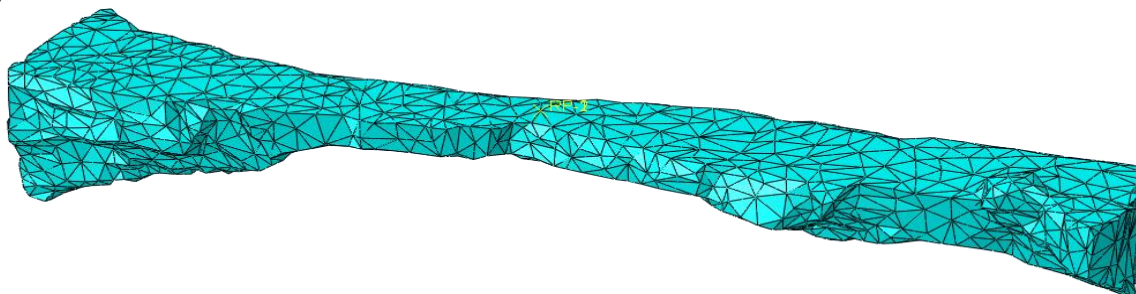
valores padrão dos parâmetros para agrupamento, como ângulo e distância máxima são respectivamente, 30° e 1 metro.

Ainda, nota-se que para ambas faces, o agrupamento em famílias para segmentação *Kd* obteve maior número de famílias de faces planares, quando comparada a segmentação com algoritmo *Fm*. Apesar disso, os valores médios de mergulho e orientação de mergulho obtidos para as duas segmentações foram semelhantes.

4.3 Simulação numérica

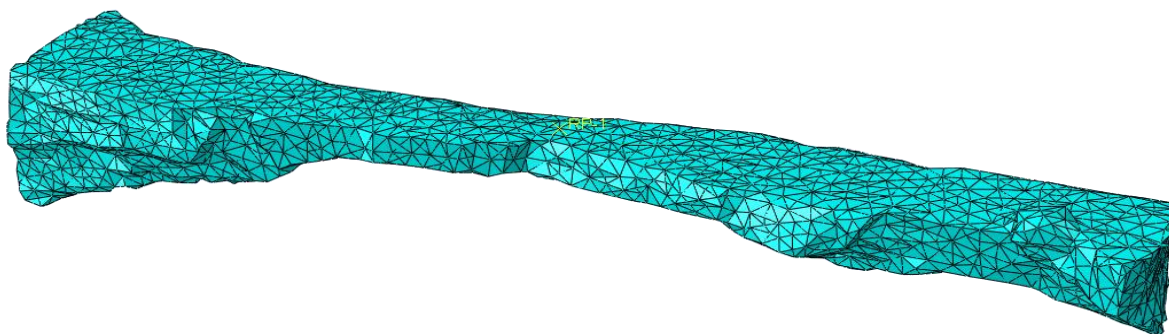
A fim de se obter uma malha adequadamente refinada, foram simulados quatro modelos com diferentes tamanhos de elementos. Para o primeiro refinamento, foi utilizado o espaçamento entre nós de 1 metro. Já para os demais refinamentos, reduziu-se o espaçamento anterior pela metade, ou seja, para o segundo, terceiro e quarto refinamentos o espaçamento entre os nós foi de, respectivamente 0,5, 0,25, e 0,125 metros. Nas Figuras 28, 29, 30 e 31 estão ilustrados os quatro refinamentos realizados.

Figura 28- Primeiro refinamento.



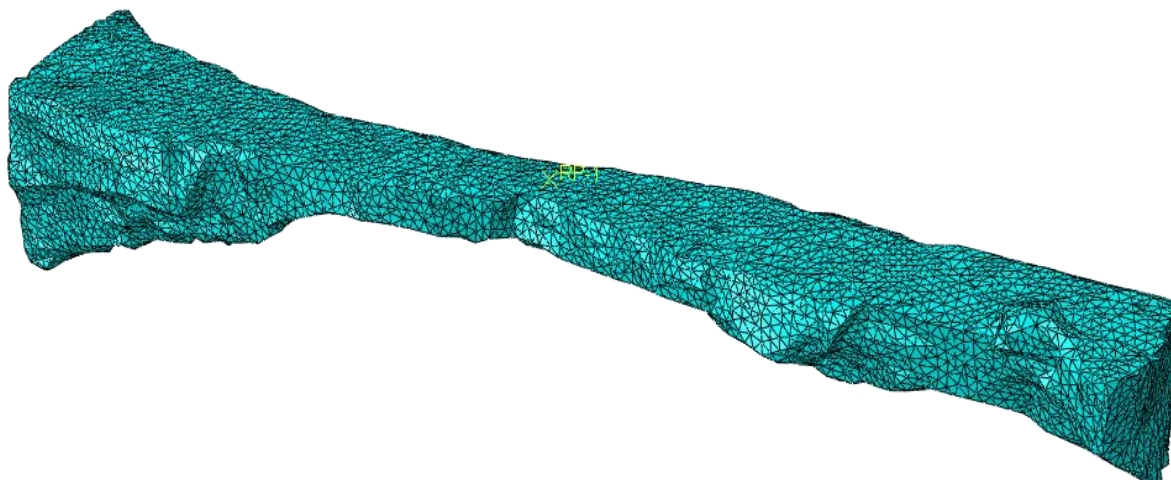
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29- Segundo refinamento.



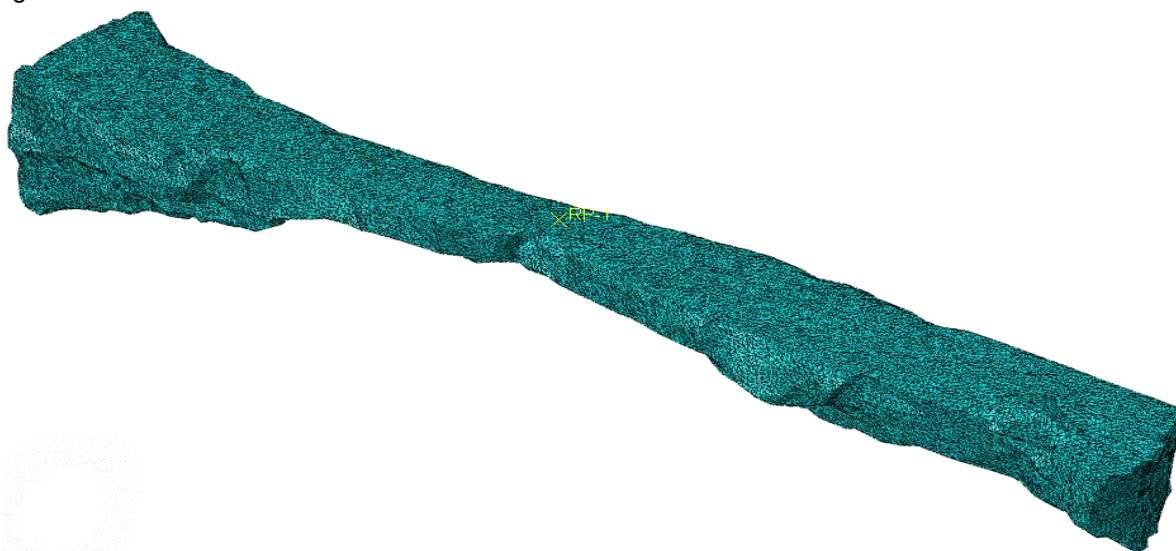
Fonte: Elaboração própria.

Figura 30- Terceiro refinamento



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31- Quarto refinamento.

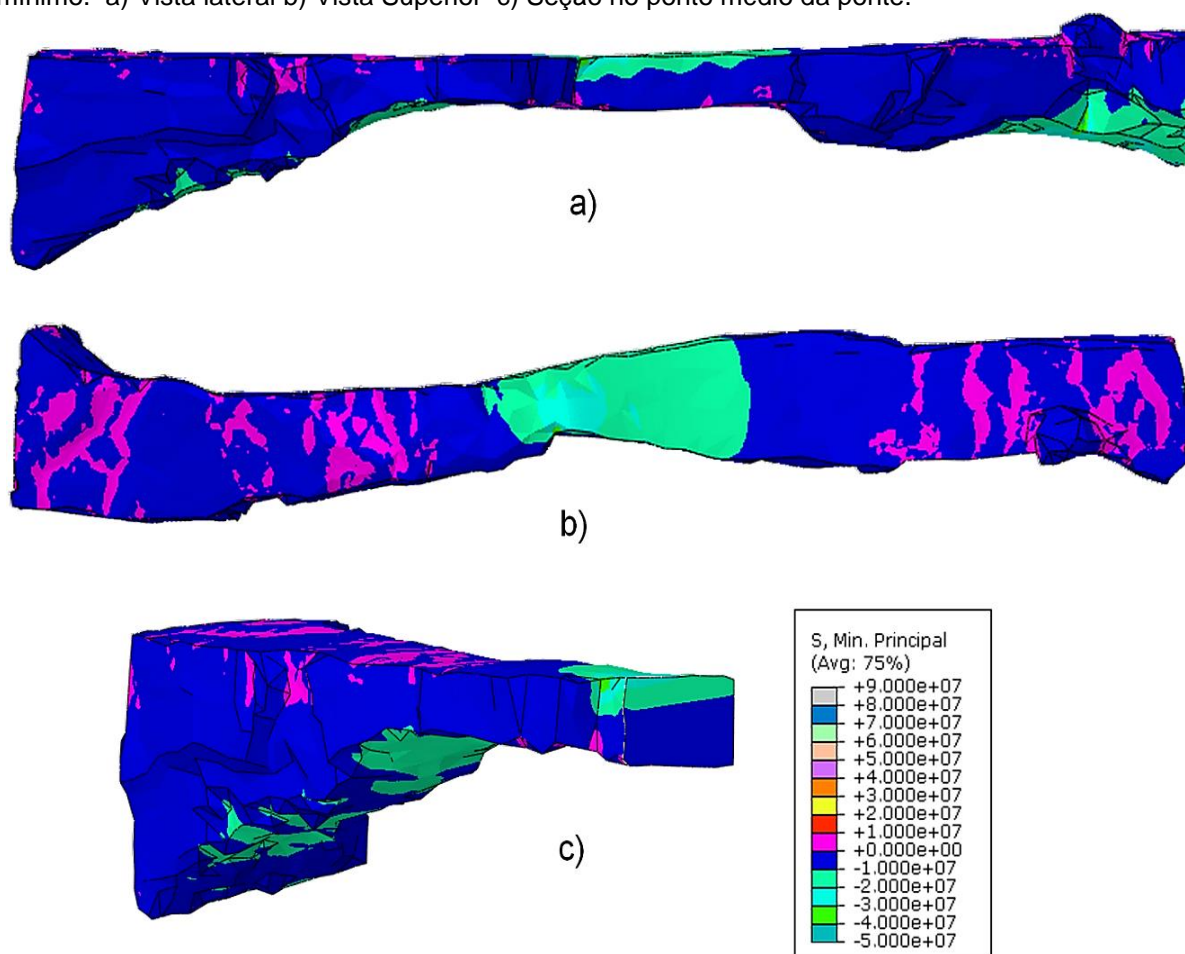


Fonte: Elaboração própria.

Para cada refinamento realizado, foram anotados os valores das deformações verticais no centro da ponte. Dentre os quatro refinamentos, optou-se por simular a malha resultante do terceiro refinamento, pois foi o primeiro modelo a apresentar constância de resultados, assim enquadrando-se em um modelo eficiente e preciso.

Nas Figuras 32 e 33 estão representadas em escala de cores as tensões principais mínimas e máximas atuantes na ponte de pedra, resultantes da simulação utilizando o módulo de elasticidade mínimo ($E_{mín} = 9,75 \text{ GPa}$).

Figura 32- Resultados para a tensão mínima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade mínimo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte.



Fonte: Elaboração própria.

Em se tratando das tensões, o *software ABAQUS* define como padrão valores negativos para tensões de compressão e positivos para tensões de tração, diferentemente da mecânica das rochas, que segundo Jaeger, Cook e Zimmerman (2007) define a compressão como positiva e a tração com valores negativos. Tal definição se deve ao fato de que em se tratando da mecânica das rochas, as tensões de compressão são mais comuns que as tensões de tração (JAEGER; COOK; ZIMMERMAN, 2007).

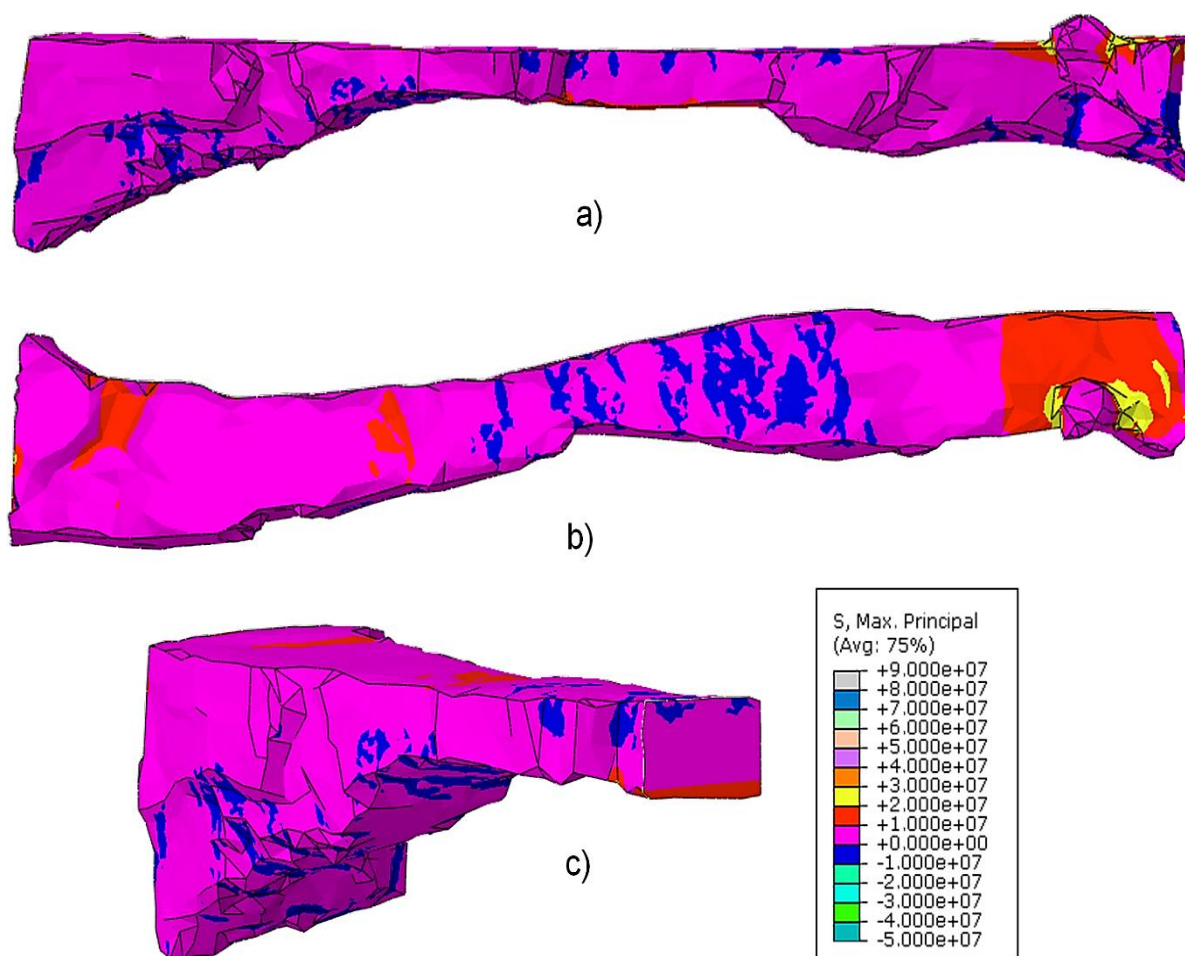
Observando a escala de cores que representa a distribuição das tensões mínimas principais (Figura 32), nota-se que a seção média da ponte é solicitada quase em sua totalidade por esforços de compressão.

Segundo Hudson e Harrison (1997), a representação das tensões atuantes em um elemento através das tensões principais fornece os valores máximos e mínimos

das tensões normais. Com isso, analisando-se a distribuição das tensões atuantes no modelo (Figura 32), observa-se que a tensão mínima principal solicitante é de tração e possui magnitude de até 10 MPa.

Já na Figura 33, estão representadas as tensões máximas principais atuantes no maciço. Analisando-se as vistas do modelo e a escala em cores, nota-se que a ponte de pedra é solicitada por uma tensão mínima principal de tração de até 30 MPa de magnitude.

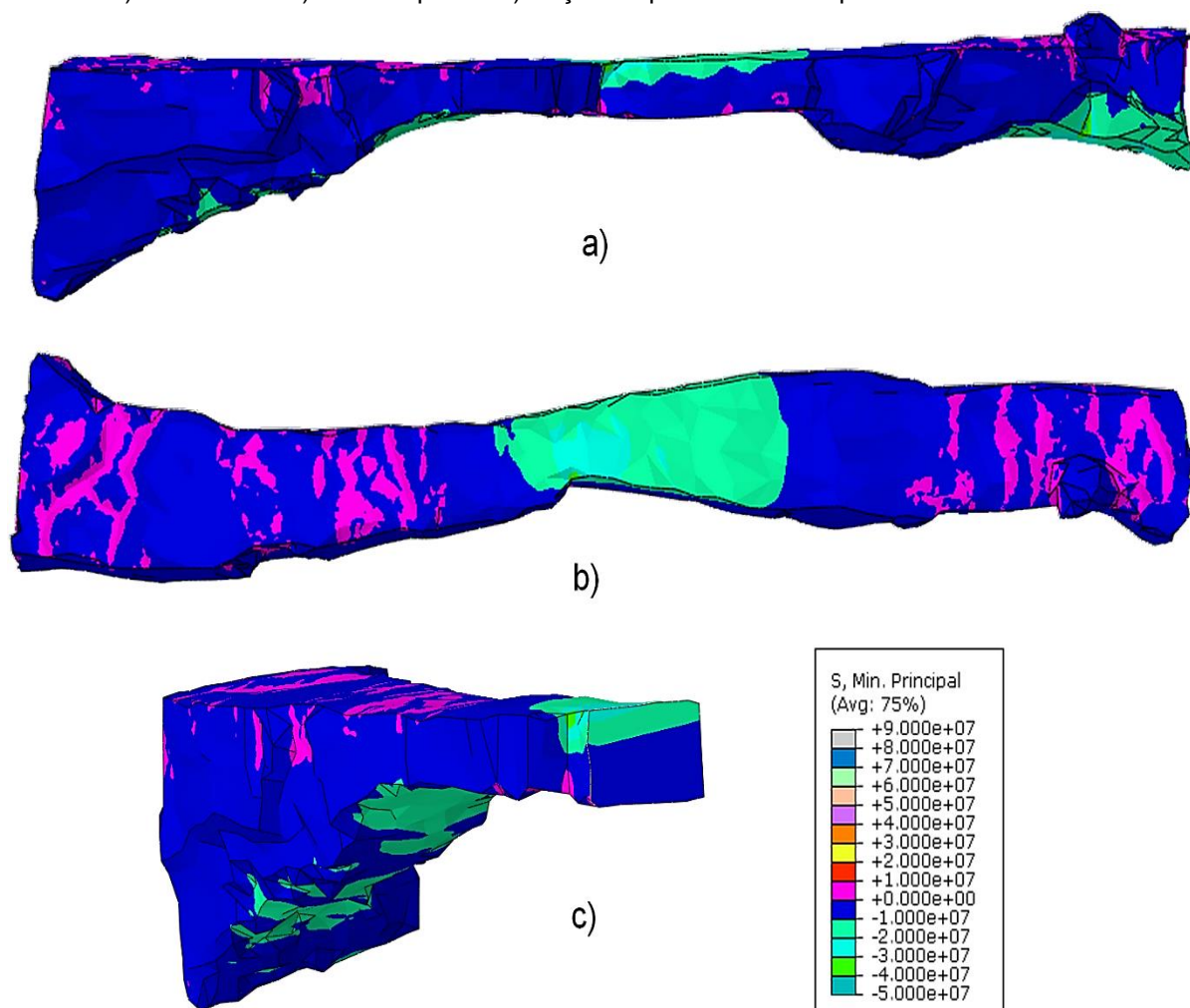
Figura 33-Resultados para a tensão máxima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade mínimo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte.



Fonte: Elaboração própria.

Utilizando-se o módulo de elasticidade máximo $E_{máx} = 20,06 \text{ GPa}$, nas Figuras 34 e 35 estão representadas as tensões principais mínimas e máximas atuantes na ponte de pedra nas faces superior e lateral e na seção média.

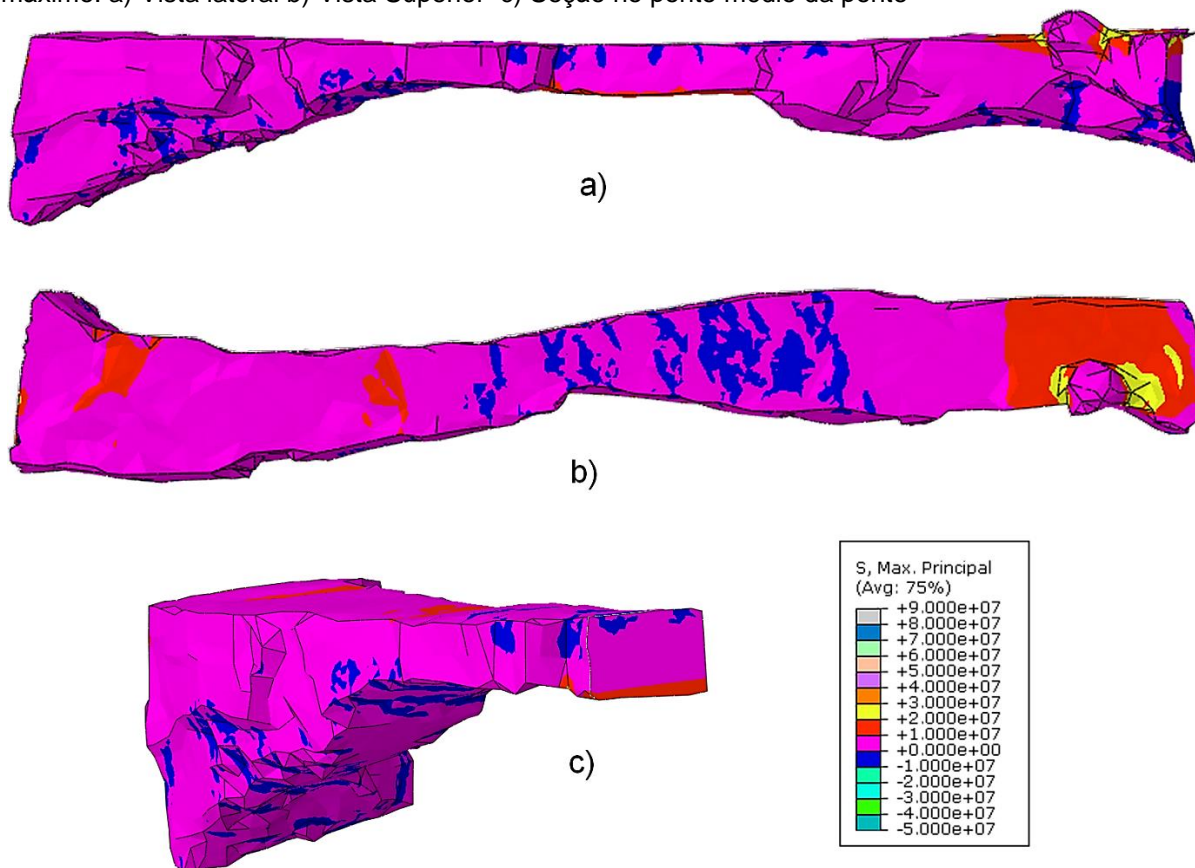
Figura 34- Resultados para a tensão mínima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade máximo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte.



Fonte: Elaboração própria.

Comparando os modelos simulados com diferentes módulos de elasticidade, observa-se que não houveram mudanças na distribuição das tensões principais no maciço. Isto era esperado, pela definição do módulo de elasticidade. A diferença será, de fato, observada nas deformações do maciço, as quais serão apresentadas na sequência.

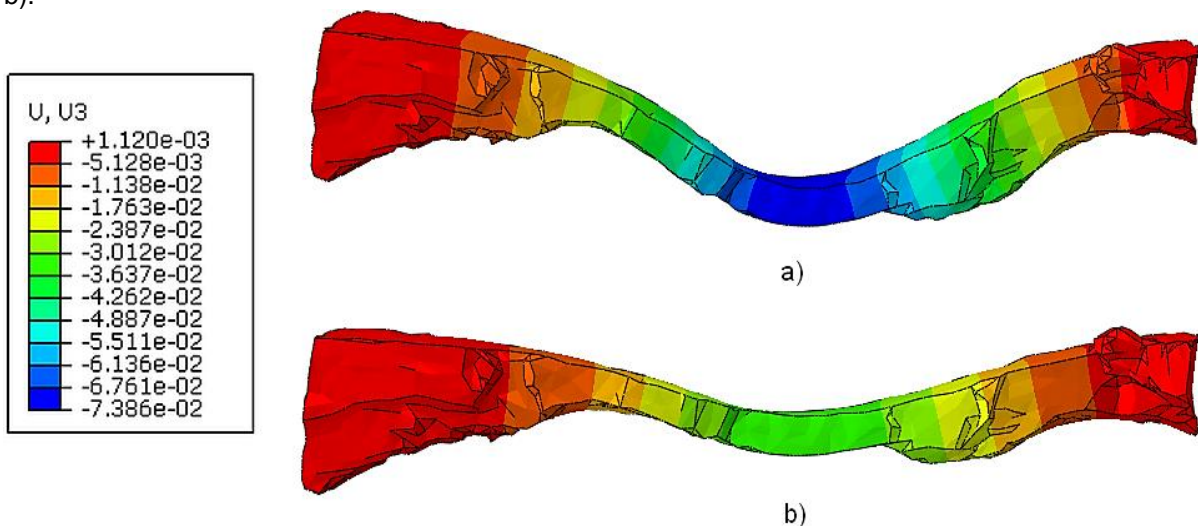
Figura 35- Resultados para a tensão máxima principal, em Pascal, com módulo de elasticidade máximo. a) Vista lateral b) Vista Superior c) Seção no ponto médio da ponte



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 36 estão representadas as deformações verticais do maciço, tanto em escala de cores quanto em corpo deformado. Na Figura 36a observamos as deformações verticais simuladas com o módulo de elasticidade mínimo e na Figura 36b utilizou-se o módulo de elasticidade máximo.

Figura 36- Deformações verticais, em metros, utilizando módulo de elasticidade mínimo a) e máximo b).



Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Figura 36 observa-se que a deformação máxima vertical do maciço utilizando o módulo de elasticidade mínimo é de aproximadamente 0,0736 metros, já a deformação utilizando o módulo de elasticidade máximo é de 0,0367 metros. Nota-se que, com o aumento do módulo de elasticidade, houve diminuição da deformação vertical do maciço. Tal fato se deve a atribuição de um comportamento linear elástico aos elementos nas simulações numéricas.

As deformações observadas no modelo não representam a deformação real do maciço, pois o modelo tridimensional gerado já inclui a deformação advinda da atuação da gravidade. Porém, fornecem uma estimativa da deformação causada pela ação da gravidade no maciço.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho atingiu os objetivos de gerar o primeiro modelo virtual tridimensional da ponte natural de pedra, estimar as orientações das faces geológicas planares e estimar a distribuição das tensões principais atuantes no maciço rochoso, utilizando metodologias relativamente rápidas e de baixo custo.

Através da fotogrametria digital aliada modelagem tridimensional baseada em *Structure from Motion* foi possível obter os seguintes produtos: modelo digital de elevação, ortomosaico e modelo virtual tridimensional. Estes modelos possibilitam o monitoramento de processos erosivos e mudanças no relevo, além da medição de distâncias, áreas e volumes de forma precisa, através de ferramentas oferecidas pelo *software*.

Ainda, através da nuvem de pontos densa da ponte de pedra, foi possível obter de forma praticamente automática, a orientação das principais faces planares presentes no maciço rochoso. Devido a impossibilidade de acesso físico às laterais da ponte, não foi possível obter as orientações das descontinuidades através do método tradicional para comparação com a metodologia utilizada neste trabalho. Porém, os valores médios de mergulho encontrados para ambas as faces afirmam a verticalidade das descontinuidades, cujo resultado está de acordo com as observações *in loco*.

As simulações numéricas em elementos finitos possibilitaram a estimativa da distribuição de tensões principais na ponte de pedra. Os valores verificados para as tensões mínimas e máximas principais são, respectivamente, 10 e 30 MPa. Foi observada uma relação inversamente proporcional entre o módulo de elasticidade e a deformação vertical, ou seja, quanto maior é o módulo de elasticidade, menor é a deformação maciço, como esperado. Porém, por se tratar de uma estimativa, a magnitude das tensões principais e deformações observadas nos modelos não são necessariamente as atuantes na ponte de pedra, devido ao estado de tensões *in situ* de um maciço depender diretamente de diversos eventos geológicos ao longo de sua história e de seu caráter heterogêneo e descontínuo. Apesar de não serem possíveis as considerações de descontinuidades e eventos geológicos, o modelo fotogramétrico possibilitou a consideração da geometria complexa da ponte de pedra, algo que não é trivial realizar sem a utilização de fotogrametria digital.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

As seguintes sugestões para trabalhos futuros são indicadas:

- Ensaio de compressão uniaxial, visando a determinação precisa da resistência a compressão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson;
- Determinação do fator de segurança da ponte de pedra, a partir de dados laboratoriais mais precisos;
- Em se tratando das propriedades das descontinuidades, através de um modelo tridimensional de alta qualidade e devidamente escalado, pode ser definido o espaçamento e frequência das descontinuidades.

REFERÊNCIAS

ASTM D 4543-01: Standard Test Method for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2001.

ASTM D 5873: Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method, ASTM International, West Conshohocken, USA, 2014. AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. **Rock Stress and Its Measurement.** [s.l.: s.n.].

ARMELIN, J. L. **Medição De Tensões in Situ Em Maciços Rochosos E Estruturas De Concreto.** [s.l.] Universidade de Brasília, 2010.

ÁVILA, C. R. DE. **Determinação Das Propriedades Mecânicas De Maciços Rochosos E/Ou Descontinuidades Utilizando Classificações Geomecânicas – Uma Comparação Entre Os Diversos Métodos De Classificação.** [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto., 2012.

BEMIS, S. P.; et al. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. **Journal Of Structural Geology.** [s.l.], V. 69, p.163-178, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsg.2014.10.007>.

BIENIAWSKI, Z. T.. **Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering.** [S.l.]: Wiley, 1989. 249 p.

BRANDI, I; BARBOSA, M; GUIMARÃES, R. Uso do esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, Carajás- PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado, SP. Anais... Campinas: SBE, 2015. p. 627-634.

BUFFON, Elaiz Aparecida Mensch; PAZ, Otacílio Lopes de Souza da; SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant) Para Mapeamento das Vulnerabilidades à Inundação Urbana: Referenciais e Bases de Aplicação. **Geography Department University Of Sao Paulo**, [s.l.], n. , p.180-189, 27 jun. 2017. Universidade de Sao Paulo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBiUSP. <http://dx.doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132547>.

CARDOZO, F.A.C.; ALMEIDA, F.A.; ZINGANO, A.C.; PIMENTA, M.M.; NOGUEIRA, R.T.; SOUZA, N.R. Esclerômetro de Schmidt em Basalto: Comparação com Ensaio de Compressão Uniaxial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 18.,2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte- Minas Gerais, 2016.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from Motion in the Geosciences.** [s.l.]: Wiley-Blackwell, 2016. 208 p.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196 p.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. 2008. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Porto Alegre. Escala 1:750.000.

FERNANDES, Sandra Daniela Ferreira. **Levantamento e Diagnóstico Estrutural com recuso a Fotogrametria**: Levantamento e Diagnóstico Estrutural com recuso a Fotogrametria. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2016.

FERNANDES, F. S. **Aplicação de fotogrametria terrestre digital na análise de descontinuidades em maciços rochosos: exame comparativo com técnicas tradicionais**. 2010. 117 f. Dissertação - Curso de Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2010

GREEN, Susie; BEVAN, Andrew; SHAPLAND, Michael. A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. **Journal Of Archaeological Science**, [s.l.], v. 46, p.173-181, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.02.030>.

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L. et al. **Ingeniería Geológica**. [s.l: s.n.].

HOERLLE, Guilherme Sonntag et al. **Monitoramento de áreas de proteção permanente através de imagens e ortofotos geradas por vants e fotogrametria**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2015, Porto Alegre. **Anais...** . Porto Alegre: Ibeas, 2015.

HUDSON, John A.; HARRISON, John P. **Engineering Rock Mechanics: an introduction to the principles**. First Edition. London: Pergamon, 2000.

ISRM - International Society of Rock Mechanics. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15 (6): p. 319-368, 1978

JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W.; ZIMMERMAN, R. W. **Fundamentals of Rock Mechanics**. Fourth Ed. ed. [s.l.] BLACKWELL PUBLISHING, 2007.

JIANPING, Yang et al. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. **Computers And Geotechnics**, [s.l.], v. 64, p.20-31, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.10.011>.

JING, L.. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.283-353, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1365-1609\(03\)00013-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1365-1609(03)00013-3).

JING, L.; HUDSON, J.a.. Numerical methods in rock mechanics. **International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences**, [s.l.], v. 39, n. 4, p.409-427, jun. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1365-1609\(02\)00065-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1365-1609(02)00065-5).

KATZ, O.; RECHES, Z.; ROEGIERS, J.-C. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, p. 723–728, 2000.

LINS, Breno Omena Lamenha. **A utilização do vant (drone) como alternativa para atualização de regularização urbana**. 2019. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Agrimensura, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2019.

MURTIYOSO, Arnadi; GRUSSENMEYER, Pierre. Documentation of heritage buildings using close-range UAV images: dense matching issues, comparison and case studies. **The Photogrammetric Record**, [s.l.], v. 32, n. 159, p.206-229, set. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/phor.12197>.

NIKOLIĆ, M.; ROJE-BONACCI, T.; IBRAHIMBEGOVIĆ, A. OVERVIEW OF THE NUMERICAL METHODS FOR THE MODELLING OF ROCK MECHANICS PROBLEMS. v. 3651, p. 627–637, 2016.

NÓBREGA, Karina Assumpção da Costa et al. **Utilização de modelos virtuais de afloramentos para análise estrutural, aplicada à recursos não convencionais**. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO - SIEPE, 10., 2018, Santana do Livramento. **Anais**. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa, 2018.

PAIN, A.; KANUNGO, D.p.; SARKAR, S.. Rock slope stability assessment using finite element based modelling – examples from the Indian Himalayas. **Geomechanics And Geoengineering**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.215-230, 3 abr. 2014. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/17486025.2014.883465>.

PALERMO, Rodrigo de Avila; LEITE, Taís Correia. **Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com o uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões**. 2015. 133 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Cartográfica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

PASETTO, Giovanni Argenta et al. **Uso da aerofotogrametria como ferramenta na mineração**. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO - SIEPE, 10., 2018, Santana do Livramento. **Anais...**. Santana do Livramento: Universidade Federal do Pampa, 2018.

PAZ, Valmor Madeira et al. **Levantamento das descontinuidades e avaliação da estabilidade de taludes da mina do Mangueirão**. Revista Monografias Ambientais, Santa Maria, v. 14, p.98-115, out. 2015. Ed. Especial Unipampa.

PINHEIRO, Antônio Luiz. **Influência das descontinuidades no comportamento geomecânico e nos modos de ruptura em taludes escavados em rochas brandas**. 2014. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

RIQUELME, A. J. et al. Computers & Geosciences A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds. **Computers and Geosciences**, v. 68, p. 38–52, 2014.

RODRIGUES, Carolina Hormigo Mateus. **Extração de Fachadas de Edifícios em Imagens Obtidas com UAV**. 2016. 43 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Cartográfica, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

RONAIB, Chrystophe et al. Estudos preliminares de caracterização litoestrutural e geomecânica em cavidades ferríferas, Carajás-pa. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Campinas. **Anais...** Campinas-SP: SBE, 2019. p. 147 - 163.

SANTOS, Daner Valcarenghi dos. **Extração semiautomática da orientação de descontinuidades com modelo tridimensional de taludes obtido por fotogrametria digital**. 2017. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Tecnologia em Mineração, Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2017.

SANTOS, Edipo André Wladeo dos. **Geração de modelos digitais de elevação a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado**. 2016. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2016.

SHENK, T. **Introduction to Photogrammetry**. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA. 2005. 95 p.

SINGIRESU, S. RAO. **The Finite Element Method in Engineering**. Fifth Edition. Florida-USA: Butterworth-Heinemann, 2010. 726 p.

STURZENEGGER, M.; STEAD, D.. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. **Natural Hazards And Earth System Sciences**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.267-287, 3 mar. 2009. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-267-2009>.

TEMBA, P. **Fundamentos da Fotogrametria**. Departamento de Cartografia - UFMG. 2000. 26 p.

Thomas Dewez, D Girardeau-Montaut, Cécile Allanic, Jérémy Rohmer. **Facets : a cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds**. XXIII ISPRS Congress, Jul 2016, Prague, Czech Republic. pp.799-804, [ff10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016ff](http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016). [ffhal-01333950f](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016ff)

TRINDADE, Carlos Alberto et al. **Estimativa de volume de área minerada utilizando técnica de Structure from Motion**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR,, 2015, João Pessoa. **Anais...** [S.L]: Sbsr, 2015.

VENTURINI, André Borin. **Imagens de Veículos Aéreos não Tripulados Aplicados para Dimensionamento de Redes de Microdrenagem Pluvial**. 2015. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

VIANA, C. D. **Análise estrutural de descontinuidades baseadas em técnicas de structure from motion: Aplicação em mina a céu aberto**. 2015. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica - Instituto de Geociências): Universidade de São Paulo, São Paulo SP, 2015.

VÖGE, Malte; LATO, Matthew J.; DIEDERICHS, Mark S.. Automated rockmass discontinuity mapping from 3-dimensional surface data. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 164, p.155-162, set. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.07.008>.

WESTOBY, M. J.; et al. **'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications**. **Geomorphology**. [s.l.], V.179, p. 300-314, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Christopher W. **Rock Slope Engineering: civil and mining**. Fourth Edition. Spons Press, 2004.

YANAGA, Silvia Sayuri. **Fotogrametria digital à curta distância na documentação do patrimônio arquitetônico – estudo de caso**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

ZHANG, Lianyang. **Engineering properties of rocks**. First Edition. Elsevier, 2005.