



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL**

**ANNE CAROLINE DA SILVA**

**“ANÁLISE ESTRUTURAL DO MACIÇO ROCHOSO PARA ORIENTAÇÃO  
OTIMIZADA DA FACE LIVRE EM PEDREIRA LOCALIZADA NO DISTRITO DE  
PÃO DE AÇUCAR, MUNICÍPIO DE TAQUARITINGA DO NORTE,  
PERNAMBUCO”**

**RECIFE**  
**2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

ANNE CAROLINE DA SILVA

**“ANÁLISE ESTRUTURAL DO MACIÇO ROCHOSO PARA ORIENTAÇÃO  
OTIMIZADA DA FACE LIVRE EM PEDREIRA LOCALIZADA NO DISTRITO DE  
PÃO DE AÇUCAR, MUNICIPIO DE TAQUARITINGA DO NORTE,  
PERNAMBUCO”**

Dissertação apresentada ao  
programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mineral da Universidade  
Federal de Pernambuco, como parte  
dos requisitos necessários à  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Mineral.

**Orientador:** Prof. Dr. Evenildo  
Bezerra de Melo

**Coorientador:** Prof. Dr. Márcio  
Luiz Siqueira de Campos Barros

RECIFE  
2016

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- S586a Silva, Anne Caroline da.  
Análise estrutural do maciço rochoso para orientação otimizada da face livre em pedreira localizada no distrito de Pão de Açúcar, município de Taquaritinga do Norte, Pernambuco / Anne Caroline da Silva. - 2016.  
77 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Evenildo Bezerra de Melo.  
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2016.  
Inclui Referências.
1. Engenharia Mineral. 2. Bloco de partição natural. 3. Descontinuidades. 4. Projeção estereográfica. 5. Ruptura em cunha. I. Melo, Evenildo Bezerra de. (Orientador). II. Barros, Márcio Luiz de Siqueira Campos. (Coorientador). III. Título.

UFPE

622.35 CDD (22. ed.)

BCTG/2016-296



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL  
PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
MESTRADO DE  
ANNE CAROLINE DA SILVA

“ANÁLISE ESTRUTURAL DO MACIÇO ROCHOSO PARA ORIENTAÇÃO  
OTIMIZADA DA FACE LIVRE EM PEDREIRA LOCALIZADA NO DISTRITO DE PÃO  
DE AÇUCAR, MUNICIPIO DE TAQUARITINGA DO NORTE, PERNAMBUCO”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MINERAIS INDUSTRIAIS

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo sob a presidência do Dr.  
Evenildo Bezerra de Melo, considera a candidata  
ANNE CAROLINE DA SILVA, Aprovada.  
Recife, 27 de julho de 2016.

---

Prof. Dr. EVENILDO BEZERRA DE MELO  
Orientador (UFPE)

---

Prof. Dr. MÁRCIO LUIZ DE SIQUEIRA CAMPOS BARROS  
Coorientador (UFPE)

---

Prof. Dra. FELISBELA MARIA DA COSTA OLIVEIRA  
Examinador Interno (UFPE)

---

Prof. Dr. MARCELO REIS RODRIGUES DA SILVA  
Examinador Externo (UFPE)

A Deus,

a meu pai Alex Sandro (*in memorian*) e minha mãe Ana Maria,

a minha avó Ivonete e minha irmã Alessandra,

dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe pelo apoio e amor incondicional.

A mineração Combritas, pela atenção ao trabalho e pela oportunidade.

Aos colegas do mestrado em Engenharia Mineral que me apoiaram.

Ao meu orientador, Prof. Evenildo Bezerra de Melo, pelo conhecimento compartilhado, pela paciência e pelas doses de motivação.

Ao meu coorientador, Prof. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros, pelo apoio e incentivo.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral da UFPE pela oportunidade.

A todos os amigos que me apoiaram e torceram pela concretização deste trabalho.

Se eu pudesse deixar algum presente a você,  
deixaria aceso o sentimento de amar a vida dos seres humanos.  
A consciência de aprender tudo o que foi ensinado pelo tempo afora.  
Lembraria os erros que foram cometidos para que não mais se repetissem.  
A capacidade de escolher novos rumos.  
Deixaria para você se pudesse, o respeito àquilo que é indispensável:  
Além do pão, o trabalho.  
Além do trabalho, a ação.  
E, quando tudo mais faltasse, um segredo:  
O de buscar no interior de si mesmo a resposta e a força para encontrar a saída.

**Mahatma Ghandi**

## RESUMO

Na pedreira Combritas, localizada no distrito de Pão de Açúcar, município de Taquaritinga do Norte, Pernambuco, procedeu-se a análise estrutural da rocha, susceptível de aplicação ao bom planejamento das aberturas das faces livres, consistindo no mapeamento geológico de detalhe das principais descontinuidades presentes no maciço a partir da coleta de dados. Possibilitou-se, assim, a projeção das feições geométrico-estruturais e as prováveis orientações de instabilidade, que definem a ruptura natural da rocha, isto é, o bloco de partição. O objetivo foi a análise das características geomecânicas evidentes na face livre e a forma como está orientada. Os prováveis tipos de rupturas foram verificados nas cinco faces livres estudadas, através das técnicas de projeções estereográficas e cônicas das descontinuidades – famílias de fraturas, foliações, tipo bandamento e xistosidade – expressivos do bloco de partição natural da rocha. Assim, buscou-se a definição das superfícies levantante, alongante e trincante, e suas interseções nas faces livres já existentes. As interpretações das projeções identificaram a tendência do maciço a rupturas em cunha. Os marcadores de deformação apontaram para o estágio frágil-rúptil dos litotipos do maciço, enquanto o bloco de partição permitiu apontar a melhor abertura da face livre, que leva à otimização de carga, essencialmente evitando-se taludes negativos e repés, reduzindo os custos financeiros. As cunhas de partição caracterizaram as dificuldades registradas nas faces livres já abertas na pedreira de agregados para a construção civil. Em essência, há obliquidade entre a foliação da rocha e as famílias de fraturas mais frequentes, traduzindo-se, em geral, com alongamentos segundo a direção NNW-SSE até NE-SW, com mergulhos para o sentido leste do que se conclui que a abertura da face livre será otimizada se respeitar a direção daquele alongamento, mergulhando do sentido leste para oeste. Alternativamente, deve ser respeitada a direção da superfície alongante da rocha, de tal modo que a face livre verticalizada, nessa situação, deverá gerar menos taludes negativos e passivos ambientais.

**Palavras-chave:** Bloco de partição natural; Descontinuidades; Projeção estereográfica; Ruptura em cunha.

## ABSTRACT

The quarry Combritas, located in Pão de Açúcar district, Taquaritinga of Norte city, Pernambuco, proceeded to the structural rock analysis that can be applied to good planning of the openings of the free faces, consisting of geological detail mapping of major discontinuities present in the mass from the data collection. It is possible, therefore, the projection of the geometric and structural features and likely directions of instability, which define the natural break the rock, that is, the partition block. The objective was to analyze the geomechanical characteristics evident on the free face and how it is oriented. The probable types of breaks were observed in five free faces studied, through the techniques of stereographic projections and conic of discontinuities - families fractures, foliation, type banding and foliation - expressive natural partition block of rock. Thus, we sought to define the boosting surfaces alongante and trincante, and their intersections on existing free faces. Interpretations of the projections identified the trend of massive breaks the wedge. Deformation marker pointed to the fragile, brittle stage of the mass lithologies while the partition block allowed to point the best opening of the free face, which leads to the load optimization essentially avoiding negative slopes and baize, reducing financial costs . The partition wedges characterized the difficulties recorded in the free faces now open in the quarry aggregates for the construction industry. In essence, there is obliquity between the foliation of the rock and the families of more frequent fractures, resulting in general with stretching according to NNW-SSE to NE-SW, with dips to the east direction than it is concluded that opening of the free face will be optimized to respect the direction of that stretch, plunging the eastbound west. Alternatively, it should be respected the direction of alongante rock surface, so that the free face vertically in this situation should generate less negative slope and environmental liabilities.

**Keywords:** Natural partition block; Discontinuities; Stereographic projection, Break wedge.

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Maciço rochoso da pedreira Combritas, em vista de corte frontal na Face Livre A1. ....                                                      | 18 |
| Figura 2. Tipos de descontinuidade – foliação, fraturas e veios – na face livre A1. ....                                                              | 20 |
| Figura 3. Orientação ou atitude de um plano estrutural. Fonte: NUGEO UFJF (2009). ....                                                                | 21 |
| Figura 4. Persistência em diferentes blocos, ABGE/CBMR (1983). ....                                                                                   | 23 |
| Figura 5. Perfis típicos de rugosidade e respectivas classificações (ISRM, 1981). ....                                                                | 24 |
| Figura 6. Comportamentos da deformação. Fonte: Modificado de Hobbs, Means, Williams (1976). ....                                                      | 27 |
| Figura 7. Deformação coaxial. Fonte: Universidade do Minho ....                                                                                       | 28 |
| Figura 8. Comportamento rúptil. Fonte: Ramsay & Huber (1976, <i>apud</i> Salamuni) ....                                                               | 28 |
| Figura 9. Comportamento rúptil. Fonte: Salamuni. ....                                                                                                 | 29 |
| Figura 10. Efeitos de uma deformação dúctil. Fonte: Universidade do Minho ....                                                                        | 30 |
| Figura 11. Efeitos de uma deformação frágil. Fonte: Universidade do Minho ....                                                                        | 30 |
| Figura 12. Falha. ....                                                                                                                                | 31 |
| Figura 13. Fratura no maciço rochoso da pedreira Combritas. ....                                                                                      | 31 |
| Figura 14. Trecho da Face livre B1: veio cortando a foliação da rocha matriz na pedreira Combritas. Vide fraturas com $d \geq 0,20m$ . ....           | 32 |
| Figura 15. Dobra antiformal em trecho da Face Livre B1, na pedreira Combritas. ....                                                                   | 33 |
| Figura 16. Foliação apresentada pelo maciço rochoso na Face Livre A1 da pedreira Combritas. ....                                                      | 34 |
| Figura 17. Gnaíse. ....                                                                                                                               | 35 |
| Figura 18. Representação gráfica dos materiais isotrópicos (a) e anisotrópicos (b). Fonte: Rueda <i>et al</i> (2010) ....                             | 35 |
| Figura 19. Linha de intersecção entre dois planos. Fonte: Marshak & Mitra (1988). ....                                                                | 37 |
| Figura 20. (a) Rede estereográfica ou rede de Wulff. (b) Rede de igual área de Lambert ou rede de Schmidt. Fonte: Rowland & Duebendorfer (1994). .... | 37 |
| Figura 21. Projeção de plano e do seu polo. Fonte: Marshak & Mitra (1988). ....                                                                       | 38 |
| Figura 22. Ruptura Planar. Fonte: Bautista (2007). ....                                                                                               | 39 |
| Figura 23. Ruptura em Cunha. Fonte: Bautista (2007). ....                                                                                             | 40 |
| Figura 24. Mapa de localização da pedreira Combritas Fonte: Google Maps (2016). ....                                                                  | 41 |
| Figura 25. Trecho do mapa geológico da área em estudo. Fonte: CPRM (2001). ....                                                                       | 43 |
| Figura 26. Imagem de satélite da pedreira Combritas com identificação das faces livres estudadas. Fonte: Google Earth (2016). ....                    | 44 |
| Figura 27. Software utilizado para tratamento dos dados. Fonte: <i>Visible Geology</i> (2016). ....                                                   | 46 |
| Figura 28. Representação de um plano em 2D e 3D na plataforma. Fonte: <i>Visible Geology</i> (2016). ....                                             | 46 |
| Figura 29. Trecho da Face Livre A1. ....                                                                                                              | 48 |
| Figura 30. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre A1. ....                                                                     | 49 |
| Figura 31. Projeção estereográfica das fraturas F4, F5, F7 e F10 da Face Livre A1. ....                                                               | 50 |
| Figura 32. Projeção estereográfica das fraturas da Face Livre A1. ....                                                                                | 51 |

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 33. Projeção estereográfica da direção da Face Livre A1 e das fraturas F4, F5, F7 e F10. ....                          | 52 |
| Figura 34. Taludes negativos e superfícies levantante e trincante da Face Livre A1. ....                                      | 53 |
| Figura 35. Fratura na Face Livre A1. ....                                                                                     | 53 |
| Figura 36. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre A2. ....                                             | 55 |
| Figura 37. Projeção estereográfica das fraturas da Face Livre A2. ....                                                        | 56 |
| Figura 38. Projeção estereográfica da direção e das fraturas F2, F4, F9 e F10 da Face Livre A2. ....                          | 57 |
| Figura 39. Veios formados durante o estado reológico dúctil da rocha na Face Livre A2. ....                                   | 58 |
| Figura 40. Veio cortando matriz rochosa na Face Livre A2. ....                                                                | 59 |
| Figura 41. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre B1. ....                                             | 60 |
| Figura 42. Projeção estereográfica das fraturas da Face Livre B1. ....                                                        | 61 |
| Figura 43. Projeção estereográfica da direção e das fraturas F1, F2, F5, F7, F11 e F14 da Face Livre B1. ....                 | 62 |
| Figura 44. Projeção estereográfica da direção da Face Livre B1 e das fraturas F1, F2, F5, F7, F11 e F14. ....                 | 62 |
| Figura 45. Veio com espessura máxima de 60 cm, caracterizando estado reológico dúctil na direção leste da Face Livre B1. .... | 63 |
| Figura 46. Dobra caracterizando o comportamento dúctil a frágil-dúctil, conforme os sigmoides, inclusive estirados. ....      | 64 |
| Figura 47. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre B2. ....                                             | 66 |
| Figura 48. Projeção estereográfica das fraturas presentes na Face Livre B2. ....                                              | 67 |
| Figura 49. Projeção estereográfica da direção e das fraturas F2, F3, F6 da Face Livre B2. ....                                | 68 |
| Figura 50. Projeção estereográfica da direção da Face Livre B1 e das fraturas F1, F2, F3 e F6. ....                           | 69 |
| Figura 51. Face Livre B2 da pedreira Combritas. ....                                                                          | 70 |
| Figura 52. Projeção estereográfica das fraturas presentes na Face Livre C. ....                                               | 72 |
| Figura 53. Projeção estereográfica das fraturas F3, F5 e F6 da Face Livre C. ....                                             | 73 |
| Figura 54. Projeção estereográfica da direção da Face Livre C e das fraturas F3, F5 e F6. ....                                | 74 |
| Figura 55. Trecho da Face Livre C. ....                                                                                       | 75 |

## TABELAS

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Classificação do espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981). .....                | 22 |
| Tabela 2. Descrição da persistência, ABGE/CBMR (1983). .....                                   | 23 |
| Tabela 3. Descrição da abertura, ABGE/CBMR (1983). .....                                       | 25 |
| Tabela 4. Graus de fraturamento (GUIDICINI <i>ET AL</i> , 1972). .....                         | 26 |
| Tabela 5. Coordenadas geográficas ( <i>Datum</i> – SAD 69) localizadas na Face Livre A1. ....  | 47 |
| Tabela 6. Atitudes das foliações da Face Livre A1. ....                                        | 48 |
| Tabela 7. Dados das descontinuidades da Face Livre A1. ....                                    | 50 |
| Tabela 8. Coordenadas geográficas ( <i>Datum</i> – SAD 69) localizadas na Face Livre A2. ....  | 54 |
| Tabela 9. Atitudes das foliações da Face Livre A2. ....                                        | 54 |
| Tabela 10. Dados das descontinuidades da Face Livre A2. ....                                   | 55 |
| Tabela 11. Atitudes dos veios da Face Livre A2. ....                                           | 58 |
| Tabela 12. Coordenadas geográficas ( <i>Datum</i> – SAD 69) localizadas na Face Livre B1. .... | 59 |
| Tabela 13. Atitudes das foliações da Face Livre B1. ....                                       | 60 |
| Tabela 14. Dados das descontinuidades da Face Livre B1. ....                                   | 60 |
| Tabela 15. Atitudes dos veios da Face Livre B1. ....                                           | 64 |
| Tabela 16. Atitudes das dobras da Face Livre B1. ....                                          | 65 |
| Tabela 17. Coordenadas geográficas ( <i>Datum</i> – SAD 69) localizadas na Face Livre B2. .... | 65 |
| Tabela 18. Atitudes das foliações da Face Livre B2. ....                                       | 65 |
| Tabela 19. Dados das descontinuidades da Face Livre B2. ....                                   | 66 |
| Tabela 20. Coordenadas geográficas ( <i>Datum</i> – SAD 69) localizadas na Face Livre C. ....  | 71 |
| Tabela 21. Dados das descontinuidades da Face Livre C. ....                                    | 71 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia Ambiental

CBMR – Comitê Brasileiro de Mecânica das Rochas

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais

ISRM – International Society of Rock Mechanics

SAD – *South America Datum*

SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

## SUMÁRIO

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                             | <b>15</b> |
| 1.1. CONSIDERAÇÕES .....                               | 15        |
| 1.2. JUSTIFICATIVA .....                               | 16        |
| 1.3. OBJETIVOS .....                                   | 17        |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                   | <b>18</b> |
| 2.1. MACIÇO ROCHOSO .....                              | 18        |
| 2.2. DESCONTINUIDADES .....                            | 19        |
| 2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES.....          | 20        |
| 2.4. DEFORMAÇÃO .....                                  | 26        |
| 2.5. ANISOTROPIA.....                                  | 35        |
| 2.6. ANÁLISE GEOMÉTRICA .....                          | 36        |
| 2.7. ANÁLISE DA RUPTURA.....                           | 39        |
| <b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>       | <b>41</b> |
| 3.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA .....                      | 41        |
| 3.2. ASPECTOS FISIOGRAFICOS.....                       | 42        |
| 3.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA ÁREA.....           | 42        |
| 3.4. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO..... | 44        |
| <b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                     | <b>45</b> |
| 4.1. LEVANTAMENTO DE CAMPO.....                        | 45        |
| 4.2. TRATAMENTO DE DADOS.....                          | 45        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                | <b>47</b> |
| 5.1. FACE LIVRE A1.....                                | 47        |
| 5.2. FACE LIVRE A2.....                                | 54        |
| 5.3. FACE LIVRE B1 .....                               | 59        |
| 5.4. FACE LIVRE B2 .....                               | 65        |
| 5.5. FACE LIVRE C.....                                 | 70        |
| <b>6. CONCLUSÃO.....</b>                               | <b>76</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                               | <b>78</b> |

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. CONSIDERAÇÕES**

A análise de um maciço rochoso inclui a descrição das características das suas descontinuidades locais que condicionam as suas propriedades geomecânicas, conferindo-lhes determinado comportamento em termos de deformabilidade, resistência, entre outras propriedades.

As descontinuidades (fraturas, veios, diques e etc.), integrantes do bloco de partição natural do maciço rochoso, representam uma dificuldade no aproveitamento otimizado dos desmontes, porque condiciona a abertura da face livre.

A obtenção dos parâmetros estruturais permite a elaboração de banco de dados utilizados nas representações gráficas das atitudes das descontinuidades presentes no maciço rochoso. Em longo prazo, este tipo de análise, aponta para o aperfeiçoamento das orientações das faces livres e das operações sequenciais de lavra.

O desenvolvimento deste estudo e as considerações geológicas-geotécnicas utilizadas foram genericamente baseadas nas observações de campo, no reconhecimento geológico e numa pesquisa bibliográfica.

O local utilizado para a pesquisa foi a pedreira Combritas, localizada no Distrito de Pão de Açúcar, município de Taquaritinga do Norte, no Estado de Pernambuco.

Esta dissertação compreende a análise estrutural para conhecimento das características das descontinuidades presentes no maciço estudado. Coerentemente com o conteúdo dos parágrafos anteriores, o seu entendimento sugere a orientação mais favorável para abertura da face livre utilizável no planeamento da lavra na pedreira.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

O maciço rochoso da pedreira Combritas é caracterizado pela presença de muitas famílias de fraturas e litotipos que apresentam anisotropia, vinculada com foliação, descontinuidades que, de um modo geral, dificultam rotineiramente as operações unitárias realizadas no local.

Tipos de descontinuidade, como fraturas de distensão e de alívio, geram dificuldades para perfuração e desmonte da rocha, como o aparecimento de taludes negativos nas faces livres e de repés, apontando a necessidade da definição do bloco de partição natural da rocha.

A coleta de dados para a análise estrutural com a utilização de projeções estereográfica e cônica é a alternativa apresentada por este trabalho, devido ao baixo custo relacionado. Sendo assim, trata-se de técnica usual na caracterização estrutural das rochas, que auxilia na prática sustentável das operações de lavra, buscando otimização da carga nas detonações, redução nos custos, aumento na recuperação de material pétreo para agregado graúdo, melhorando a estabilidade do maciço e oferecendo melhores resultados e condições de planejamento ao trabalho, com mais segurança aos operários.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

O trabalho aborda a caracterização do maciço rochoso, através da análise estrutural das descontinuidades que o constituem, a fim de subsidiar o planejamento de lavra, buscando a face livre que permite melhor rendimento e produtividade das operações unitárias realizadas e do produto final a ser utilizado como agregado.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Realização levantamento geométrico-estrutural das faces livres da cava da pedreira;
- Caracterização a hierarquização, por predominância, dos tipos de rochas existentes na pedreira;
- Verificação a intervenção (ou o desdobramento) na reprodutibilidade da qualidade da brita;
- Verificação os parâmetros das descontinuidades, uma vez que há mais de um litotipo, em cada face livre;
- Caracterização geomecânica do maciço rochoso, tanto quanto possível, indicando o estágio de deformação alcançado;
- Representação com o auxílio de software, em projeção cônica, o bloco de partição natural da rocha, sugerindo a orientação que favorece a abertura de cada face livre.
- Alerta para as consequências dos possíveis problemas na lavra, quando da não análise da partição natural do maciço;

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. MACIÇO ROCHOSO

O maciço rochoso é do ponto de vista do seu aproveitamento em engenharia, um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados. O material que forma os blocos é denominado de rocha intacta, sendo esta a matriz do maciço. Portanto, o maciço rochoso é constituído por um meio sólido (matriz rochosa) e pelas discontinuidades que o compartimentam (Figura 1).



Figura 1. Maciço rochoso da pedreira Combritas, em vista de corte frontal na Face Livre A1.

Estas discontinuidades funcionam, portanto, como superfícies de fraqueza que separam blocos de “rocha intacta” e controlam os processos de deformação e ruptura dos maciços rochosos a cotas superficiais, que são as que interessam a grande maioria das obras de engenharia. São também elas que permitem a extração dos materiais rochosos nas pedreiras onde, naturalmente, se aproveitam as superfícies de fraqueza para obter o desmonte primário das massas explosivas (DA COSTA, 2007).

Para o estudo do comportamento do maciço rochoso devem ser analisar as propriedades, tanto da “matriz rochosa” como das discontinuidades. Porém, para maciços de

qualidade média à elevada, as descontinuidades são o aspecto fundamental a ter em conta no comportamento mecânico do maciço (BARTON *ET AL*, 1974; BIENIAWSKI, 1979).

De acordo com Da Costa (2007), esta estrutura “em blocos” confere uma natureza descontínua aos maciços rochosos. Por outro lado, a presença de descontinuidades sistemáticas com determinada orientação, como os planos de estratificação, ou superfícies de laminação, implicam um comportamento anisotrópico à rocha, ou seja, suas propriedades variam segundo a direção considerada.

As características do maciço diferem de local para local. Logo, uma característica importante é a heterogeneidade ou variabilidade das propriedades do maciço rochoso em zonas distintas ou até mesmo de ponto para ponto. Geralmente, os maciços rochosos são mais heterogêneos que as rochas intactas, apresentando várias famílias de descontinuidades.

## 2.2. DESCONTINUIDADES

Sob a designação de descontinuidade engloba-se qualquer feição planar que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso. O estudo das descontinuidades de um maciço rochoso mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam, de maneira muito forte, o seu comportamento.

Segundo Fiori (2009), a estabilidade e a deformabilidade de maciços rochosos dependem, em parte, da presença de descontinuidades nas rochas. As juntas, falhas, contatos litológicos, foliações metamórficas e veios ou diques são considerados as descontinuidades mais comuns, onde a existência de uma ou mais destas, ocasiona um agregado descontínuo de blocos nos maciços, sendo suas características físicas distintas de uma rocha intacta.

Ainda de acordo com Fiori (2009) e por definição, descontinuidade é considerada um plano de fraqueza na rocha, ao longo do qual o material rochoso é estruturalmente descontínuo e apresenta uma menor resistência ao cisalhamento. O aproveitamento seguro e economicamente viável do maciço está diretamente ligado às suas características.

As descontinuidades são as responsáveis pelo rendimento das operações de lavra nas pedreiras. A maioria dos depósitos é afetada por distintas orientações de fraturas.

Um conjunto de descontinuidades com a mesma atitude e gênese caracteriza uma família. Um conjunto de famílias que é característico de uma dada zona do maciço define um sistema. Esta variedade de famílias de descontinuidades resulta em irregularidade nos blocos (Figura 2), geralmente, provocando a necessidade de desmontes secundários.



Figura 2. Tipos de descontinuidade – foliação, fraturas e veios – na face livre A1.

No geral, o levantamento estrutural e a classificação geomecânica compreendem em observações *in situ* e na coleta de dados para definir famílias de descontinuidades podendo classificá-las conforme algum padrão de direções e tensões, o que possibilita orientar a lavra e a qualidade dos blocos (FIGUEIREDO, 2014).

### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

O modelo estrutural de um maciço rochoso representa a distribuição espacial das descontinuidades e suas características geométricas, o que permite reconhecer quais as mais importantes no condicionamento do comportamento do respectivo maciço rochoso (FREITAS, 2011).

O estudo da distribuição espacial das discontinuidades, através da investigação estrutural, compreende a definição dos sistemas de famílias e respectivas atitudes, espaçamentos e persistências.

Com o intuito de padronizar o levantamento das discontinuidades, a ISRM (1978) publicou uma sugestão de método para descrição de discontinuidades de maciços rochosos, utilizando os parâmetros a seguir:

### 2.3.1. Orientação

É a atitude de um plano, normalmente definida pela sua direção e mergulho. A direção pode ser entendida como o ângulo que uma linha horizontal do plano faz com o Norte (azimute). O mergulho é dado por uma linha perpendicular à direção (linha de maior declive), sendo que o azimute desta linha nos dá o sentido do mergulho e o ângulo que esta linha faz com a horizontal nos dá o ângulo de mergulho verdadeiro ou inclinação verdadeira da camada. Portanto, a posição ocupada no espaço por uma estrutura geológica planar é definida pela sua direção e pelo ângulo de mergulho, ou seja, a inclinação do plano.

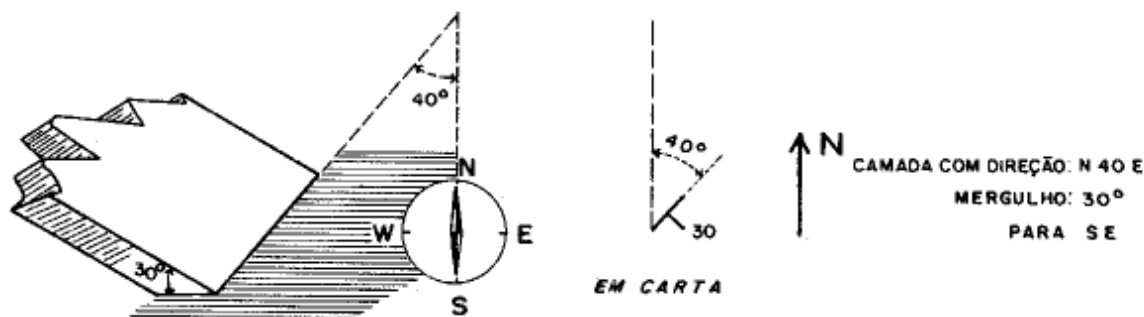


Figura 3. Orientação ou atitude de um plano estrutural. Fonte: NUGEO UFJF (2009).

A representação gráfica das coordenadas das discontinuidades pode ser realizada através de projeção estereográfica, diagrama de roseta, representações tridimensionais ou de símbolos em mapas geológicos.

A orientação controla as possibilidades de condições de instabilidade e um número de deformações excessivas.

### 2.3.2. Espaçamento

É considerado como a distância perpendicular entre dois planos consecutivos de descontinuidades pertencentes a uma mesma família representando o espaçamento médio de uma família de juntas.

Os espaçamentos das descontinuidades condicionam o tamanho dos blocos individuais de rocha intacta, influenciando o comportamento do maciço rochoso.

De modo geral, a descrição dada ao espaçamento entre as descontinuidades é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981).

| <b>Descrição</b>       | <b>Espaçamento (m)</b> |
|------------------------|------------------------|
| Extremamente próximas  | < 0,02                 |
| Muito próximas         | 0,02 – 0,06            |
| Próximas               | 0,06 - 0,2             |
| Moderadamente próximas | 0,2 – 0,6              |
| Afastadas              | 0,6 – 2                |
| Muito afastadas        | 2 – 6                  |
| Extremamente afastadas | > 6                    |

Os principais fatores que condicionam os espaçamentos das descontinuidades são as tensões de origem tectônica, a litologia e também a profundidade a que se encontram as formações que contêm as descontinuidades. O espaçamento tem grande influência na permeabilidade do maciço e nas características de percolação.

O espaçamento é obtido por meio de medidas efetuadas ao longo de uma direção determinada, que pode ser uma sondagem ou uma linha de levantamento sistemático de descontinuidades em afloramentos.

### 2.3.3. Persistência

A persistência corresponde à maior extensão de um plano de descontinuidade conforme observado em um afloramento. É um parâmetro ligado ao tamanho e à forma geométrica da estrutura e, por isso, profundamente afetada pela orientação e dimensão da superfície rochosa.

A Tabela 2 apresenta a descrição da persistência das descontinuidades dada sua extensão.

Tabela 2. Descrição da persistência, ABGE/CBMR (1983).

| Descrição   | Persistência (m) |
|-------------|------------------|
| Muito baixa | < 1              |
| Baixa       | 1 – 3            |
| Média       | 3 – 10           |
| Alta        | 10 – 20          |
| Muito alta  | > 20             |

Uma descontinuidade é denominada persistente quando suas extremidades não se encontram nos afloramentos. A persistência de uma fratura é condicionada, também, pela sua ordem de aparecimento em uma sequência de eventos de fraturamento. As juntas mais recentes sempre apresentam a tendência ou de se originar a partir de outra superfície mais antiga, ou de se interromper nelas.

No geral, são necessárias ao menos três famílias sistemáticas de descontinuidades, razoavelmente contínuas, para a formação de blocos rochosos bem definidos. A figura 4 ilustra aspectos da formação de blocos, em função da persistência dos sistemas de descontinuidades.

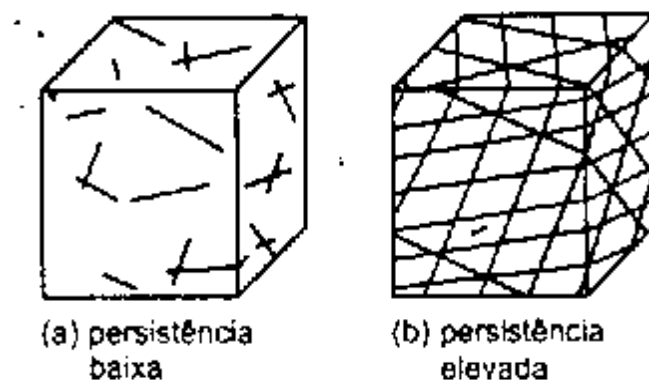


Figura 4. Persistência em diferentes blocos, ABGE/CBMR (1983).

#### 2.3.4. Rugosidade

As rugosidades correspondem as irregularidades superficiais que estão relacionadas com o atrito entre as paredes das descontinuidades. Irregularidades em grande escala são chamadas de ondulações. A rugosidade e ondulação contribuem para a resistência ao cisalhamento. Ondulações em grande escala podem modificar o mergulho local.

Em geral, as irregularidades no plano de uma descontinuidade se manifestam na escala da ordem de alguns metros, quando são caracterizadas como ondulações, ou em dimensões milimétrica a centimétrica, quando são identificadas como rugosidade ou aspereza.

De acordo com o ISRM (1981), podem utilizar-se perfis típicos de rugosidade com duas escalas de observação: a pequena (em centímetros; irregularidades de superfície detectáveis a pequena escala: rugosa, lisa e espelhada) e a intermediária (alguns metros; patamar, ondulada e planar) que resulta na combinação de nove classes (Figura 5).

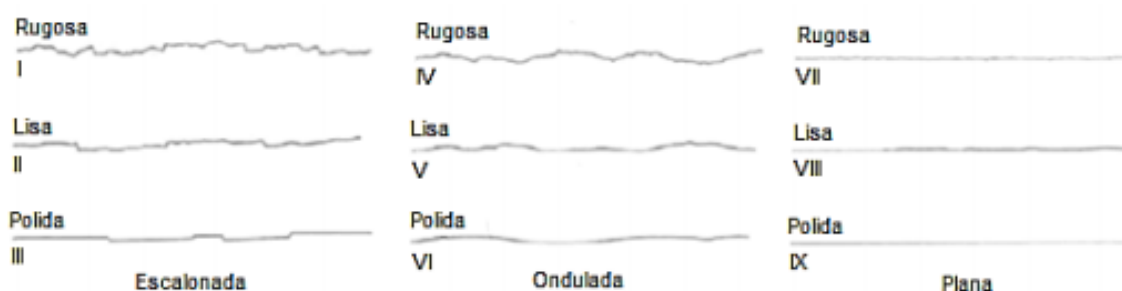


Figura 5. Perfis típicos de rugosidade e respectivas classificações (ISRM, 1981).

### 2.3.5. Resistência das paredes

Refere-se à resistência à compressão das paredes adjacentes a uma descontinuidade. Esta resistência deve ser menor que a da rocha intacta devido à alteração das paredes proporcionada pela presença das descontinuidades.

O grau de alteração próximo à superfície das fraturas afeta a resistência das mesmas e se as paredes estão em contato, tem-se uma importante componente da resistência ao cisalhamento.

### 2.3.6. Abertura

É a distância medida na perpendicular, entre as superfícies adjacentes de uma descontinuidade, considerando que o interior pode estar preenchido com ar ou água ou então vazio (ISRM, 1978). A Tabela 3 apresenta a descrição das aberturas de acordo com sua distância.

Tabela 3. Descrição da abertura, ABGE/CBMR (1983).

| <b>Descrição</b> | <b>Abertura</b> |
|------------------|-----------------|
| Muito fechadas   | < 0,1 mm        |
| Fechadas         | 0,1 – 0,25 mm   |
| Abertas          | 0,5 – 2,5 mm    |
| Cavernosas       | > 1 m           |

A abertura das discontinuidades é importante no estudo da percolação de água no interior dos maciços rochosos e caracteriza-se como o espaço, vazio ou preenchido por água, que separa suas paredes, distinguindo-se nesse aspecto eventuais preenchimentos ou mineralizações que podem ocupar o plano da discontinuidade.

A abertura atual de uma junta, entretanto, não coincide necessariamente com sua abertura original, que pode ter sido modificada em estágios posteriores a sua formação, como ocorre no processo de erosão ou de soerguimento dos maciços quando a fratura é trazida a níveis mais rasos.

#### 2.3.7. Preenchimento

Corresponde ao material que separa as paredes de uma discontinuidade e que usualmente é mais fraco que a rocha que lhe deu origem. Em geral, os materiais típicos de preenchimento são: areia, silte, argila, brecha e milonito. Também inclui minerais secundários e discontinuidades seladas, por exemplo: quartzo e veios de calcita.

As características e a espessura do material de preenchimento condicionam o comportamento das discontinuidades e sua condutividade hidráulica.

#### 2.3.8. Percolação

Está relacionada com o fluxo de água e umidade livre, visível em discontinuidades individuais ou no maciço rochoso como um todo.

A água é um dos agentes mais importantes na erosão dos solos e na alteração das rochas. A percolação de água no maciço rochoso resulta principalmente do fluxo através de discontinuidades.

#### 2.3.9. Número de Famílias

É a quantidade de famílias que compõem um sistema de juntas. O maciço rochoso pode conter também discontinuidades individuais.

### 2.3.10. Grau de fraturamento

O grau de fraturamento expressa a quantidade de fraturas por metro linear de maciço. São as dimensões dos blocos de rocha que resultam da orientação das famílias de juntas que se interceptam e do espaçamento das famílias individuais. Descontinuidades individuais podem influenciar o tamanho e a forma dos blocos.

Utilizado principalmente na descrição de testemunhos, ele difere do espaçamento por não estar relacionado à distância perpendicular entre fraturas de uma mesma família, mas reflete a quantidade de pedaços em que o maciço ficou fragmentado.

Guidicini *et al* (1972) propõe a classificação da Tabela 4 para determinar o grau de fraturamento do maciço rochoso.

Tabela 4. Graus de fraturamento (GUIDICINI ET AL, 1972).

| <b>Número de fraturas por metro</b> | <b>Denominação</b>       |
|-------------------------------------|--------------------------|
| < 1                                 | Ocasionalmente fraturado |
| 1 – 5                               | Pouco fraturado          |
| 6 – 10                              | Medianamente fraturado   |
| 11 – 20                             | Muito fraturado          |
| > 20                                | Extremamente fraturado   |

Observa-se, ainda, a relação entre o espaçamento das descontinuidades e o grau de fraturamento do maciço rochoso, a medida em que, quanto menor o espaçamento (fraturas mais próximas), haverá uma maior quantidade de fraturas por metro, aumentando o grau de fraturamento do maciço.

## 2.4. DEFORMAÇÃO

A análise estrutural de um maciço rochoso constitui uma ferramenta de fundamental importância no planejamento da lavra em maciços rochosos. A estabilidade e a deformabilidade de maciços rochosos dependem, em grande parte, da presença de descontinuidades nas rochas e do estágio reológico de seus marcadores de deformação (ARAÚJO, 2014).

A deformação é a transformação de uma geometria inicial em uma geometria final por meio de translação ou rotação de corpo rígido, deformação interna e/ou mudança de volume (FOSSEN, 2012).

Uma deformação é uma resposta mecânica complexa dos materiais às tensões que atuam sobre ele durante um determinado período de tempo. Marcadores de deformação podem ser definidos como elementos estruturais indicadores de descontinuidades em maciços rochosos, e esses marcadores estão relacionados a esforços aos quais a rocha é submetida, resultando em diferentes elementos estruturais denunciadores do estágio de deformação que interessam ao estudo da engenharia.

O estudo dos marcadores de deformação consiste em analisar a intensidade da presença dos mesmos para identificação do estágio de deformação que será de utilidade em otimizar sua extração através do processo de lavra em pedreiras.

Um estado de tensão pode se expressar segundo duas componentes:

- Tensão normal – orientada perpendicularmente ao plano considerado, pode ser compressiva ou distensiva;
- Tensão cisalhante ou de corte – orientada paralelamente ao plano considerado.

A deformação pode ser instantânea como ocorre em eventos sísmicos, ou então o processo se dá por meio de incrementos infinitesimais, gerando uma deformação progressiva. A deformação pode ser homogênea (uniforme) ou heterogênea (não uniforme), como mostra a Figura 6.

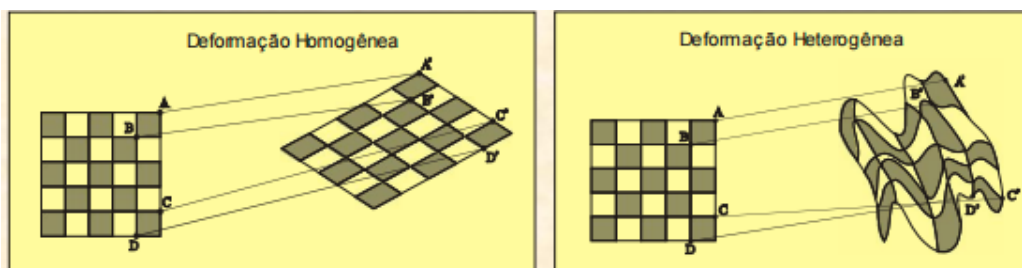


Figura 6. Comportamentos da deformação. Fonte: Modificado de Hobbs, Means, Williams (1976).

Na deformação homogênea, os elementos originalmente paralelos (planos e linhas) se mantêm paralelos durante todo o processo deformacional (característica típica de translação). Na deformação heterogênea, o paralelismo não é mantido e a deformação varia de ponto a ponto. Na natureza, quase a totalidade dos casos de deformação é heterogênea.

Tanto a deformação homogênea quanto a heterogênea podem sofrer processos de deformação diferenciados, representados por deformações não-rotacionais (coaxiais) ou rotacionais (não-coaxiais).

A deformação coaxial (ou cisalhamento puro ou deformação não-rotacional) caracteriza processos de deformação que provocam movimentos no mesmo eixo de incidência (coaxial), porém em sentidos opostos (Figura 7).

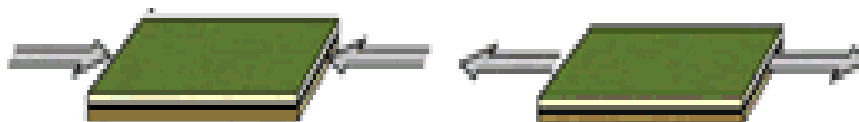


Figura 7. Deformação coaxial. Fonte: Universidade do Minho

As forças compressivas conduzem à redução do volume da rocha na direção paralela à atuação das forças e ao seu alongamento na direção perpendicular. As forças distensivas conduzem ao alongamento (estiramento) da rocha, na direção paralela à atuação das forças (Figura 7).

Na deformação não-coaxial (ou cisalhamento simples), a deformação provoca movimento rotacional no corpo, havendo movimento em porções diferentes (não-coaxial) e com sentidos opostos.

Em relação à deformação, se observam alguns comportamentos:

- Comportamento rúptil: quando são geradas fraturas de tensão ou partição e fraturas de cisalhamento (que podem caracterizar um par conjugado). As fraturas formam ângulos  $\theta$  teóricos da ordem de 30° entre si (Figura 8).

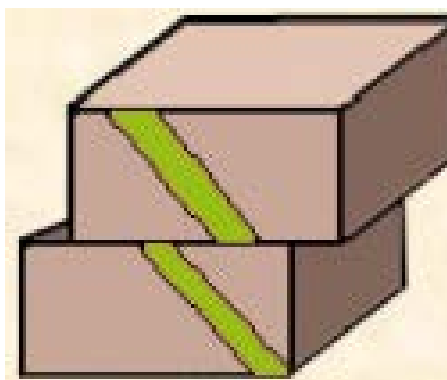


Figura 8. Comportamento rúptil. Fonte: Ramsay & Huber (1976, *apud* Salamuni)

- Comportamento dúctil: as rochas sujeitas à temperaturas e pressões elevadas tendem a dobrar-se sem fraturarem, podendo haver estiramento ou encurtamento. No caso de comportamento dúctil homogêneo, a deformação também é chamada de achatamento. No comportamento dúctil heterogêneo, o estiramento pode resultar em boudinage, enquanto o encurtamento pode resultar em dobras.

- Comportamento rúptil: as discontinuidades encontram-se em modelo de fratura, denominado de Modelo de Riedel, ocorrendo estruturas como, fratura de tensão (ou partição) T, fratura de cisalhamento de RIEDEL (sintética ou R), fratura de cisalhamento conjugada de RIEDEL (antitética ou R'), fratura de cisalhamento P (sintética secundária), fratura de cisalhamento X (sintética secundária), fratura de cisalhamento Y ou D, que se forma paralelamente ao binário em casos extremos (Figura 9).

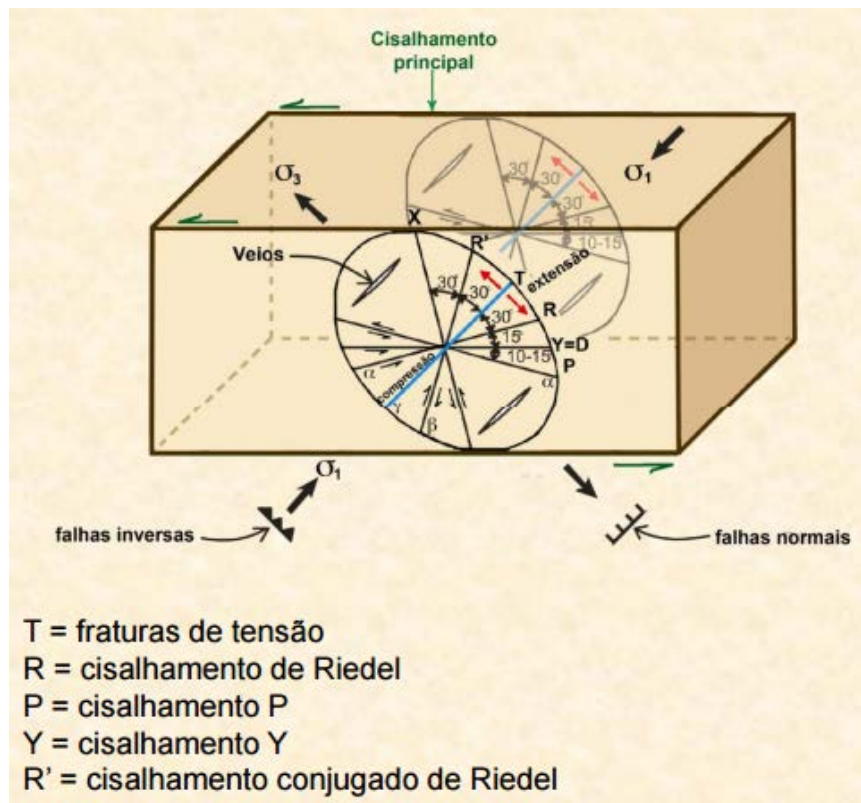


Figura 9. Comportamento rúptil. Fonte: Salamuni

Em resposta à tensão aplicada sobre a rocha, pode ocorrer a sua deformação em três estágios:

- Deformação elástica: é reversível, o material deforma, mas quando a tensão cessa, recupera sua forma/volumes iniciais e verifica-se quando a força aplicada sobre a rocha não ultrapassou o seu limite de elasticidade;

- Deformação plástica (ou dúctil): é permanente, o material fica deformado sem romper e verifica-se quando a força aplicada sobre a rocha é superior ao seu limite de elasticidade e inferior ao limite de plasticidade. É chamada deformação contínua quando não se verifica descontinuidade entre partes contíguas do material deformado. A Figura 10 mostra os efeitos de uma deformação dúctil;

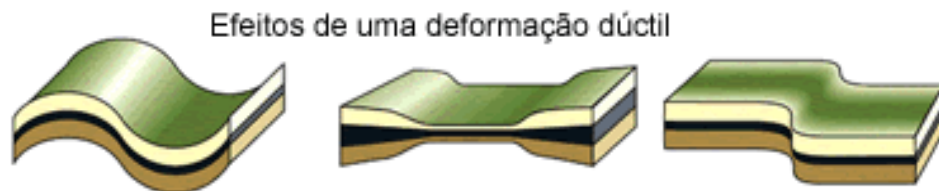


Figura 10. Efeitos de uma deformação dúctil. Fonte: Universidade do Minho

- Deformação frágil: o material se fratura. Verifica-se quando a força aplicada sobre a rocha é superior ao seu limite de plasticidade originando deformações descontínuas, como as falhas. A Figura 11 mostra os efeitos de uma deformação frágil.

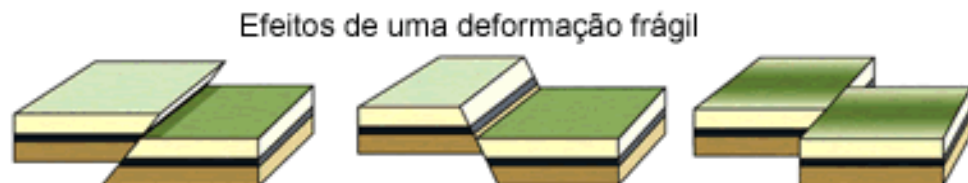


Figura 11. Efeitos de uma deformação frágil. Fonte: Universidade do Minho

#### 2.4.1. Falhas

Como deformações mais frequentes, podem ser citadas as dobras e as falhas. Uma falha é uma superfície de fratura ao longo da qual ocorreu o movimento relativo dos blocos fraturados. Podem resultar da atuação de qualquer tipo de tensão em rochas com comportamento frágil (Figura 12).

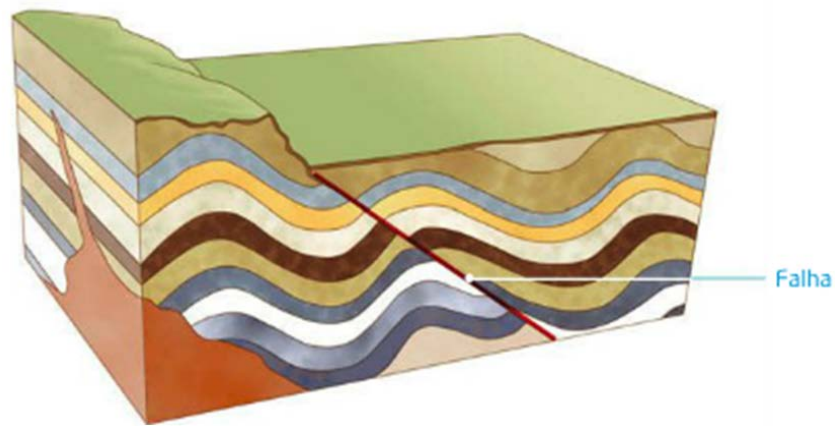


Figura 12. Falha

#### 2.4.2. Fraturas

As fraturas são descontinuidades formadas em resposta a esforços internos ou externos atuantes no corpo fraturado. É uma deformação por ruptura, um plano que separa em duas partes um bloco de rocha ou de uma camada, e ao longo do qual não se deu seu deslocamento. Portanto, caracterizam o campo da deformação rúptil (Figura 13).



Figura 13. Fratura no maciço rochoso da pedreira Combritas.

Podem ser abertas ou fechadas, com ou sem preenchimento. A atitude e o espaçamento são importantes para a qualificação do maciço, e representam o enfraquecimento.

Um veio é uma fratura preenchida por precipitados minerais ou argila (Figura 14).

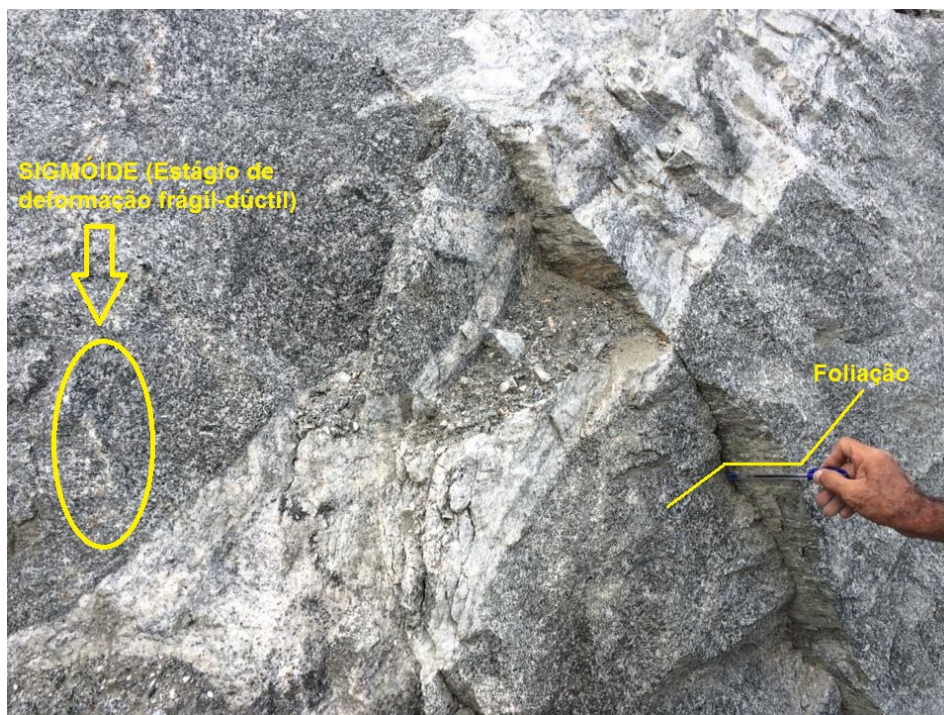


Figura 14. Trecho da Face livre B1: veio cortando a foliação da rocha matriz na pedreira Combritas. Vide fraturas com  $d \geq 0,20\text{m}$ .

A Figura 14 mostra ainda elementos estruturais provocados por deformações ocorridas nos maciços devido a movimentos transcorrentes, denominados de sigmoides, e caracterizam o estágio de deformação frágil-dúctil do maciço rochoso.

#### 2.4.3. Dobras

Uma dobra é uma deformação em que se verifica o encurvamento de superfícies originalmente planas. Quanto ao aspecto geométrico a dobra pode ser antiforme, quando sua convexidade está voltada para cima, ou sinforme, quando a convexidade está voltada para baixo.

As dobras resultam da atuação de tensões de compressão em rochas com comportamento dúctil (Figura 15).



Figura 15. Dobra antiforme em trecho da Face Livre B1, na pedreira Combritas.

#### 2.4.4. Foliação

A foliação é um termo relacionado com *estruturas planares* não só para rochas metamórficas como também para as rochas magmáticas, devido ao arranjo paralelo dos minerais. Sob este aspecto, xistosidade e gnaissificação são foliações típicas. Alguns autores utilizam o termo como sinônimo de bandamento composicional dos gnaisses (alternância de bandas claras e escuras). Outros utilizam o termo *superfícies* - *S* designando qualquer estrutura plana, independente de qual seja sua origem.

A Figura 16 mostra trecho da Face Livre A1, na pedreira Combritas e a orientação da foliação presente.



Figura 16. Foliação apresentada pelo maciço rochoso na Face Livre A1 da pedreira Combritas.

A xistosidade é uma estrutura representada pelo desenvolvimento de minerais placóides e/ou tabulares/prismáticos. Trata-se de um elemento estrutural da rocha, evidenciado pela existência de planos paralelos (foliação) resultantes da existência de uma forte recristalização dos minerais que a constituem, especialmente os micáceos. Como resultado a rocha divide-se em finas lâminas paralelas. Caracteriza-se por uma intensa anisotropia planar.

A xistosidade é uma foliação característica de médio a alto grau de metamorfismo. A rocha que apresenta um maior grau de metamorfismo é o gnaiss (Figura 17).



Figura 17. Gnaiss.

## 2.5. ANISOTROPIA

A anisotropia é a condição de variabilidade de propriedades físicas e mecânicas de um corpo rochoso ou mineral segundo direções diferentes, como por exemplo, a variação do módulo de deformabilidade e da resistência à compressão simples nas rochas com xistosidade ou foliação.

Um corpo é anisotrópico em relação a uma propriedade quando esta propriedade tem valores diferentes segundo a direção considerada. A anisotropia pode se manifestar em qualquer propriedade dependente da direção que se considera (Figura 18).

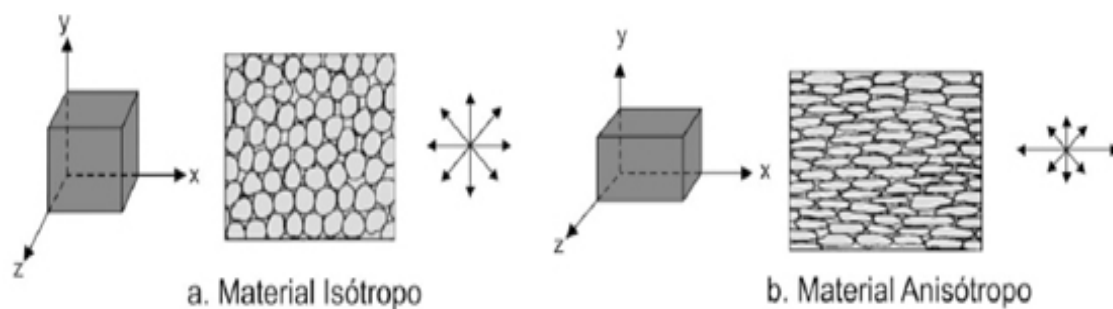


Figura 18. Representação gráfica dos materiais isotrópicos (a) e anisotrópicos (b). Fonte: Rueda *et al* (2010)

A orientação da anisotropia estrutural influi na deformação. A anisotropia estrutural é um fator reológico intrínseco à deformação de rochas, a exemplo da foliação.

A anisotropia é uma importante característica a ser observada durante o mapeamento e a coleta de dados no trabalho em campo, indicando, juntamente com os dados estruturais das descontinuidades, a melhor orientação para abertura e disposição das faces livres na cava.

## 2.6. ANÁLISE GEOMÉTRICA

A análise geométrica é o tipo de análise de estruturas que se detém na forma, orientação geográfica, tamanho e relações geométricas entre a estrutura principal e as estruturas de menor escala associadas.

De acordo com Fossen (2012), a forma é a descrição espacial de superfícies abertas ou fechadas como interfaces de camadas dobradas ou superfícies de falha. A forma das camadas dobradas pode fornecer informações sobre o processo de dobramento ou as propriedades mecânicas da camada dobrada, enquanto a curvatura de uma falha pode ter implicações sobre a deformação da capa ou a direção de deslocamento.

As atitudes de estruturas lineares e planas talvez sejam os dados estruturais mais comuns. Na análise geométrica, é conveniente representar os dados de atitudes em projeções estereográficas, que são usadas para mostrar ou interpretar a atitude e a geometria das estruturas. O método é rápido e eficiente, e constitui a ferramenta mais amplamente utilizada na apresentação e interpretação de dados espaciais.

A descrição e a análise geométrica constituem a base para a quantificação ou análise de deformação.

### 2.6.1. Projeção Estereográfica

A projeção estereográfica é um método rápido, fácil e eficaz para resolver problemas geométricos em geologia estrutural que permite projetar linhas e planos e determinar a orientação da linha de intersecção de dois planos (Figura 19).

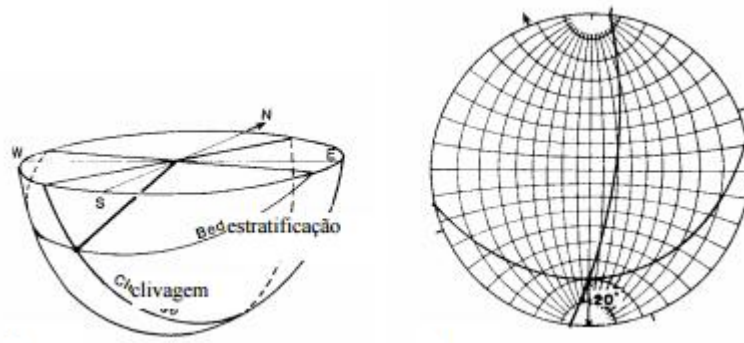


Figura 19. Linha de intersecção entre dois planos. Fonte: Marshak & Mitra (1988).

A projeção estereográfica é a representação de feições espaciais planares ou lineares. Ela possibilita o entendimento de situações da geologia estrutural, transformando as estruturas em dados tridimensionais e em conjuntos de planos e retas. (CARNEIRO, 1996).

É feita utilizando uma rede estereográfica de áreas líquidas e ângulos líquidos iguais. Existem dois tipos de redes, a de Schmidt e a rede de Wulff (Figura 20).

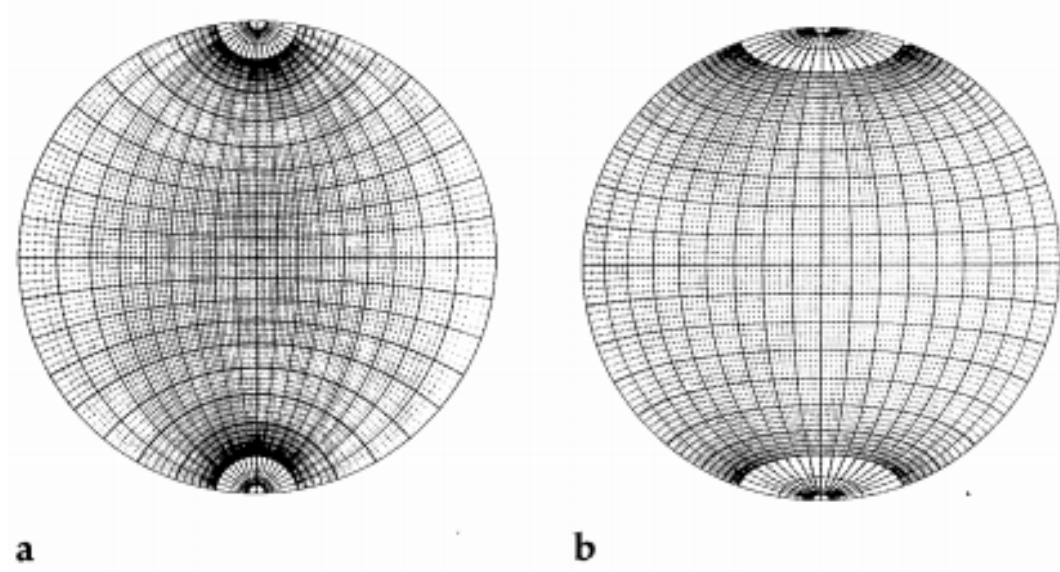


Figura 20. (a) Rede estereográfica ou rede de Wulff. (b) Rede de igual área de Lambert ou rede de Schmidt. Fonte: Rowland & Duebendorfer (1994).

A projeção em rede de Wulff é conhecida por projeção de igual ângulo. Nesta projeção, qualquer círculo maior é representado por um arco de circunferência no plano equatorial de projeção. A projeção em rede de Schmidt é conhecida como projeção igual área.

Nas aplicações práticas de engenharia, a utilização da projeção de igual área é preferível para o tratamento de dados das orientações das discontinuidades, já que permite uma representação gráfica com menores distorções. A projeção de igual ângulo, nomeadamente quando se recorre a aplicações manuais, pode se apresentar com alguma vantagem pela facilidade de recurso à utilização do compasso para executar certas construções gráficas. Apesar destas diferenças entre os tipos de projeção indicados, a filosofia de abordagem dos problemas é idêntica para qualquer deles.

Os termos rede de Wulff ou rede estereográfica referem-se apenas às redes desenhadas em uma projeção estereográfica. O termo estereograma refere-se aos pontos ou curvas projetados em uma rede estereográfica.

O estereograma é definido como a representação traçada dentro do grande círculo horizontal em conjunto com uma ou mais direções de uma bússola cardinal (RAGAN, 2009).

A orientação de qualquer plano pode ser representada especificando a orientação da normal ao plano (Figura 21). A projeção de um plano é um arco circular e a da linha perpendicular ao plano é um ponto. O polo de um plano é um ponto no estereograma que representa a normal ao plano.

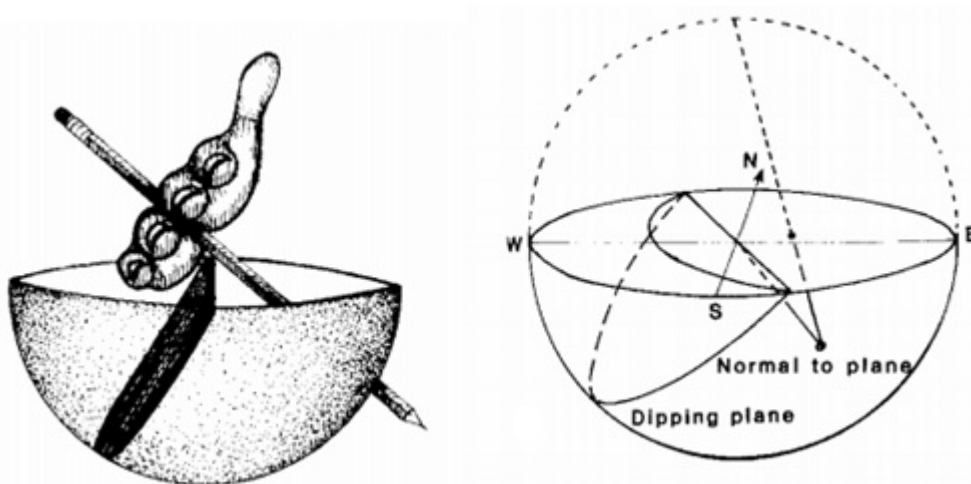


Figura 21. Projeção de plano e do seu polo. Fonte: Marshak & Mitra (1988).

## 2.7. ANÁLISE DA RUPTURA

Os diferentes tipos de ruptura são condicionados pelo grau de fraturamento do maciço rochoso e pela orientação e distribuição das descontinuidades em relação ao talude. Em maciços rochosos resistentes, as descontinuidades determinam a situação dos planos de ruptura.

### 2.7.1. Ruptura Planar

De acordo com Bautista (2007), a condição básica é a presença de uma descontinuidade mergulhando a favor do talude e com mesma direção, cumprindo a condição na qual o ângulo de mergulho do talude seja maior do que da descontinuidade ( $\psi > \omega$ ), e este por sua vez maior que o ângulo de atrito interno ( $\omega > \phi$ ), como mostrado na Figura 22.

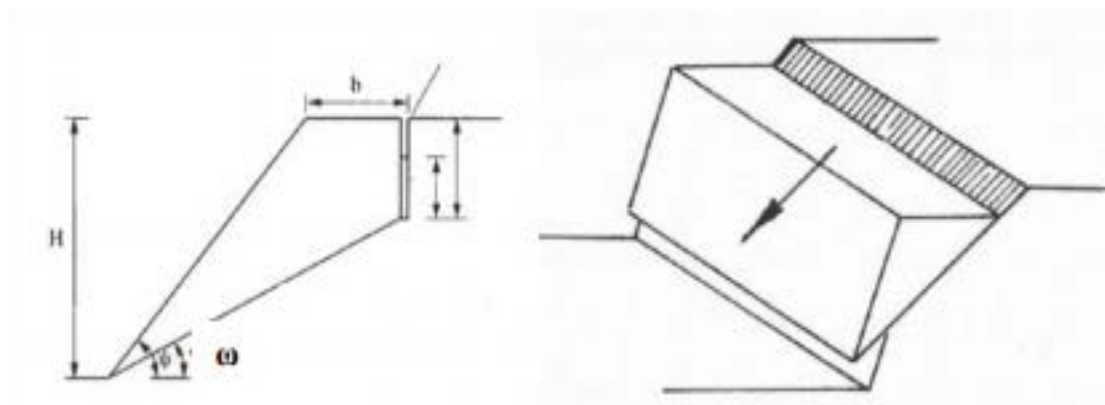


Figura 22. Ruptura Planar. Fonte: Bautista (2007)

### 2.7.2. Ruptura em Cunha

Corresponde ao deslizamento de um bloco em forma de cunha, formado por dois planos de descontinuidades, na direção de sua linha de interseção. Para que seja produzido este tipo de ruptura, devem aflorar na superfície do talude e devem-se cumprir as mesmas condições para ruptura planar ( $\psi > \omega > \phi$ ), mas neste caso,  $\omega$  é o mergulho da linha de intersecção (BAUTISTA, 2007).

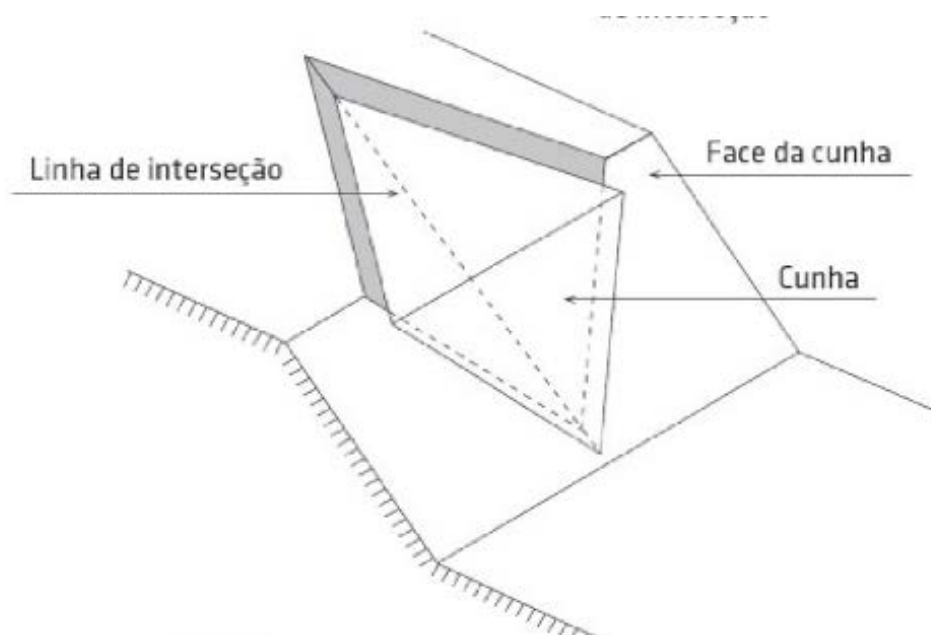


Figura 23. Ruptura em Cunha. Fonte: Bautista (2007)

Para efeito deste trabalho, serão analisadas as possíveis condições de ruptura do maciço rochoso da pedreira. Para a determinação do deslizamento de blocos, se faz necessário o conhecimento de outros fatores, como, por exemplo, o ângulo de atrito ( $\phi$ ).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A caracterização da área em estudo, apresentada neste capítulo, inicia-se com uma descrição de sua localização, clima, vegetação, relevo e aspectos referentes à geologia da área. Tais informações foram obtidas através de relatórios cedidos pela empresa. Informações referentes a aspectos geométricos do local também serão evidenciados nesse capítulo.

#### 3.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A área em estudo está situada na Região Agreste do Estado de Pernambuco, no distrito de Pão de Açúcar, município de Taquaritinga do Norte.

O acesso é facilmente realizado pela rodovia PE-160, seguindo no sentido do município de Santa Cruz do Capibaribe. A entrada da pedreira está a cerca de 800 m da rodovia.



Figura 24. Mapa de localização da pedreira Combritas Fonte: Google Maps (2016).

Abrange 42,95 ha, delimitada por um polígono retangular que tem um vértice coincidente com o ponto de coordenadas geográficas – *Datum* SIRGAS 2000: Latitude 07°56'50,90" S e Longitude 36°09'13,90 W, sendo este o ponto de amarração. A área da cava ocupa cerca de 20 ha.

### 3.2. ASPECTOS FISIOGRAFICOS

O clima da região é o semi-árido com chuvas de inverno durante os meses de maio a julho. A precipitação anual varia de 650 a 950 mm, podendo atingir valores mais elevados (1200 mm) em áreas de mesoclima, tendo temperatura anual com média em torno de 28°C.

Geomorfologicamente, a área encontra-se inserida na interface de dois modelos de relevo. Na porção norte tem-se um relevo arrasado constituído por metassedimentos xistosos com ondulações pontuais. Contrastando com esta morfologia encontra-se ao sul um relevo caracterizado por um modelo ondulado à fortemente ondulado, representado por serras com cotas superiores a 850 mm, destacando-se na região as serras da Taquara e Juburu.

A Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe domina toda a região em foco, caracterizada por apresentar uma configuração dendrítica e secundariamente angular.

A flora da região é representada por estepe (caatinga), dominada por formação arbórea densa, localmente pouco deformada.

### 3.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DA ÁREA

Com base em informações obtidas na CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais), pode-se concluir que a área de estudo está situada nas suítes magmáticas da Era Neoproterozóica (Figura 25), caracterizadas por biotita-anfibólio granitoides grossos a porfiríticos, com enclaves dioríticos e fácies sieníticas.

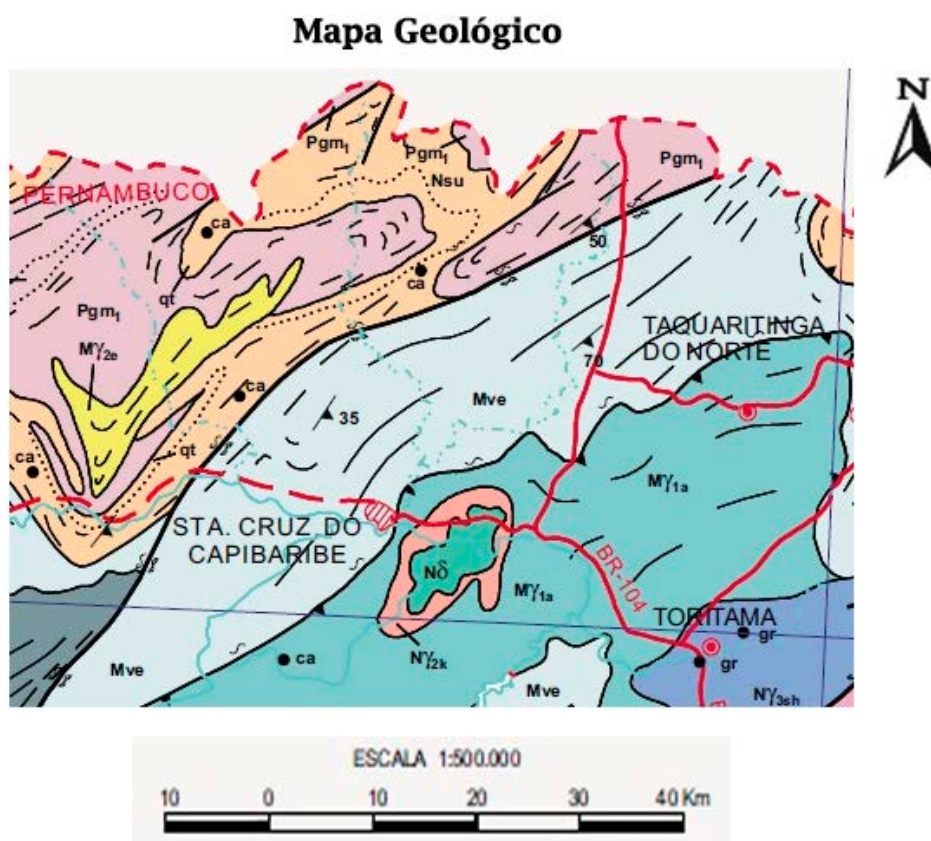


Figura 25. Trecho do mapa geológico da área em estudo. Fonte: CPRM (2001).

No local da coleta de dados, observaram-se, em geral, três tipos de rochas:

- Quantidades equivalentes entre uma matriz máfica, com cristais submilimétricos, diferenciando-se de litotipo com leve predomínio de cristais félsicos sigmoidais, com dimensões menores ou iguais a centímetro
- Rocha matriz, com predomínio de indivíduos cristalinos máficos, menores ou iguais a milímetro e fenocristais félsicos com pouca expressão sigmoidal.
- Rocha extensivamente presente como uma matriz com cristais milimétricos a submilimétricos, máficos (escuros) a ultramáficos, finos, em quantidades maiores que uma rocha com cristais claros;
- Rocha com cristais félsicos, na forma de fenocristais ocorrem em quantidade superior àquela rocha máfica.

### 3.4. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A ÁREA DE ESTUDO

A cava possui bancadas com alturas entre 5 a 18 m de altura, com quatro faces livres internas á cava e uma externa (Figura 26). Foi aberta segundo a direção NNE-SSW, praticamente N-S.



Figura 26. Imagem de satélite da pedreira Combritas com identificação das faces livres estudadas. Fonte: Google Earth (2016).

Para fins de estudo, as cinco faces livres foram denominadas A1, A2, B1, B2 e C, a serem descritas no Capítulo 5. A face livre da bancada A, está dividida em duas seções, A1 e A2, de acordo com a mudança na direção de sua face livre, bem como a bancada B, dividida nas faces B1 e B2. A face C é externa à cava.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. LEVANTAMENTO DE CAMPO

Para a realização deste trabalho, iniciou-se o acompanhamento das atividades de lavra na pedreira a partir de julho de 2014 até abril de 2016. Foram levantados pontos com GPS Garmin etrex20 e bússola. Também se utilizou do software *Google Earth* para obtenção de imagens de satélite do local de estudo.

O trabalho realizado em campo compreendeu as seguintes etapas:

- Reconhecimento e medição das frentes de lavra;
- Análise das descontinuidades existentes no maciço rochoso e sua posterior caracterização;
- Análise visual dos componentes minerais;
- Determinação das atitudes dos marcadores de deformação mais predominantes da rocha.

### 4.2. TRATAMENTO DE DADOS

Os dados levantados em campo foram tratados pela plataforma online *Visible Geology Beta* (Figura 27). A plataforma permite que dados referentes à estruturas geológicas sejam analisadas de forma didática e simples, criando desde projeções estereográficas à blocos diagramas.



Figura 27. Software utilizado para tratamento dos dados. Fonte: *Visible Geology* (2016).

O *Stereonet* é um recurso disponível no programa que permite uma representação tridimensional de dados, a partir da representação dos dados em estereogramas (Figura 28).

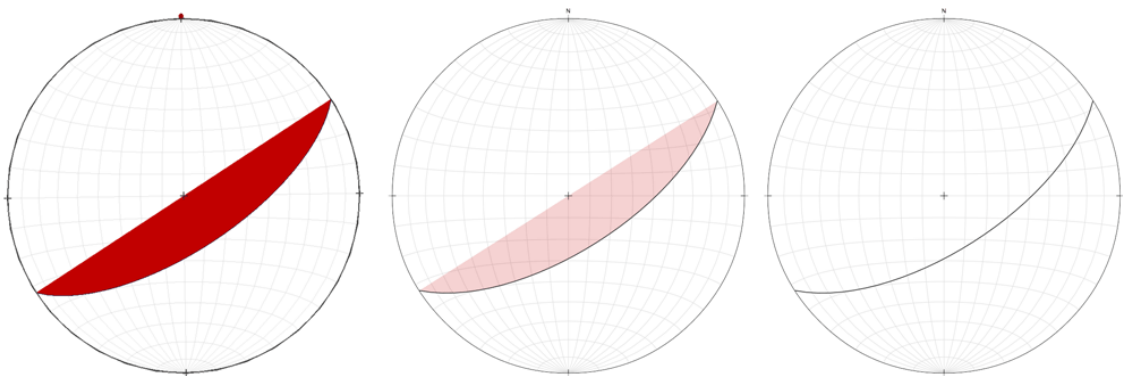


Figura 28. Representação de um plano em 2D e 3D na plataforma. Fonte: *Visible Geology* (2016).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante as visitas de campo, realizaram-se o reconhecimento e a caracterização das descontinuidades presentes nas faces livres da cava. É possível ordenar as fraturas medidas em cada frente de lavra, destacando o comportamento das três principais famílias, bem como caracterizar os principais marcadores de deformação.

A definição do bloco de partição primário é norteadada pela ordenação dos planos naturais de descontinuidades, sua frequência (por metro), e o comportamento como superfícies alongante, levantante e trincante do bloco de partição.

As faces livres foram setorizadas de acordo com sua posição relativa dentro da cava e a direção, foram mapeadas individualmente em toda sua extensão, com exceção da Face C onde o mapeamento foi realizado apenas no trecho mais acessível.

A avaliação dos dados estruturais de cada face livre permitiu a identificação dos possíveis modos de ruptura dos blocos de rocha. Aqui será apresentado, para cada face, o estereograma de distribuição de famílias projetadas pelo programa *Visible Geology*.

### 5.1. FACE LIVRE A1

A Face Livre A1 está disposta segundo a direção NE-SW e se localiza entre as coordenadas geográficas da Tabela 5.

Tabela 5. Coordenadas geográficas (*Datum* – SAD 69) localizadas na Face Livre A1.

|                                        |                                                    |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>PONTO 1</b><br><b>Face livre A1</b> | <b>07°56'43,2" Sul</b><br><b>36°09'17,7" Oeste</b> |
| <b>PONTO 2</b><br><b>Face livre A1</b> | <b>07°56'42,3" Sul</b><br><b>36°09'17,9" Oeste</b> |

Apresenta uma pequena camada de solo e vegetação nativa como capeamento, com altura entre 15 e 18 metros até seu ponto mais inferior na cava, sendo bastante fraturada e com silicificação em algumas áreas (Figura 29). A face possui cerca de 30 m de comprimento.

Há rochas que podem ser classificadas como quartzo monzodiorito pórfiro a sienodiorito inequigranular, com variedade de minerais acessórios claros e escuros.



Figura 29. Trecho da Face Livre A1.

As atitudes das foliações presentes na Face Livre A1 são apresentadas na Tabela 6. A presença de foliações na face indica que estas terão maior influência na partição natural do maciço rochoso, devido à sua frequência (mais de 100 por metro) e definem a orientação da rocha.

Tabela 6. Atitudes das foliações da Face Livre A1.

| Elemento estrutural | Direção         | Mergulho    |
|---------------------|-----------------|-------------|
| Foliação 1          | 015°Az – 195°Az |             |
|                     | (N15°E – S15°W) | 17°/105° Az |
| Foliação 2          | 005°Az – 185°Az |             |
|                     | (N 5°E – S 5°W) | 30°/095° Az |

A Foliação 1 ( $015^\circ\text{Az} - 195^\circ\text{Az}$ ), com mergulho de  $17^\circ/105^\circ\text{Az}$ , tende a atuar como superfície levantante do maciço, ou seja, a base do bloco de partição, devido ao seu fraco mergulho. A Foliação 2 ( $005^\circ\text{Az} - 185^\circ\text{Az}$ ), com mergulho de  $30^\circ/095^\circ\text{Az}$ , influenciará na superfície alongante, pois quando há a presença de foliações na rocha, estas se sobrepõem em relação às demais fraturas e descontinuidades, na partição natural do maciço. Ambas as foliações possuem direções NNE-SSW e estão representadas na Figura 30, de acordo com suas atitudes, com o auxílio do programa *Visible Geology*.

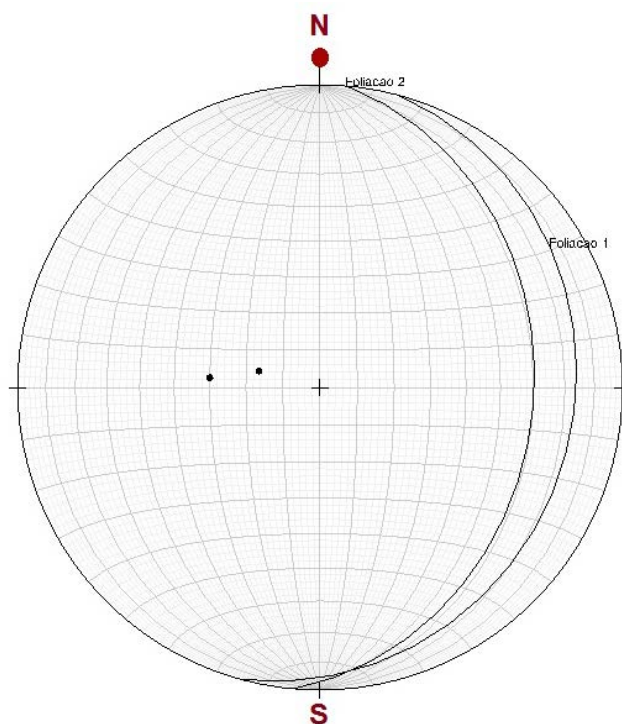


Figura 30. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre A1.

Foram tomadas medidas de 11 famílias de fraturas expostas na face, com atitudes descritas na Tabela 7.

Tabela 7. Dados das descontinuidades da Face Livre A1.

| Fratura | Direção           | Mergulho    | Distância<br>d (cm) | Frequência<br>f (n°/m) |
|---------|-------------------|-------------|---------------------|------------------------|
| F1      | 110° Az - 290° Az | 78°/200° Az | $\geq 30$           | 2/m                    |
| F2      | 020° Az - 200° Az | 80°/110° Az | $\geq 10$           | 4/m                    |
| F3      | 170° Az - 350° Az | Vertical    | $\geq 15$           | 3-4/m                  |
| F4      | 060° Az - 240° Az | 85°/330° Az | $\geq 5$            | 8/m                    |
| F5      | 040° Az - 220° Az | Vertical    | $\geq 15$           | 5-6/m                  |
| F6      | 085° Az - 265° Az | 70°/175° Az | $\geq 20$           | 2-3/m                  |
| F7      | 065° Az - 245° Az | Vertical    | $\geq 3$            | 6/m                    |
| F8      | 105° Az - 285° Az | 40°/195° Az | $\geq 40$           | 1-2/m                  |
| F9      | 025° Az - 205° Az | 65°/295° Az | $\geq 30$           | 3/m                    |
| F10     | 035° Az - 215° Az | 85°/125° Az | $\geq 5$            | 4-5/m                  |
| F11     | 125° Az - 305° Az | 10°/035° Az | $\geq 15$           | 3-4/m                  |

Observa-se na Tabela 7 que as fraturas F4 (060°Az – 240°Az), F5 (040°Az – 220°Az), F7 (065°Az – 245°Az) e F10 (035°Az – 215°Az), apresentam direções e mergulhos próximos (praticamente verticais), com destaque para F4 que possui maior frequência (8 fraturas por metro) em relação às demais. A Projeção estereográfica destas fraturas é mostrada na Figura 31.

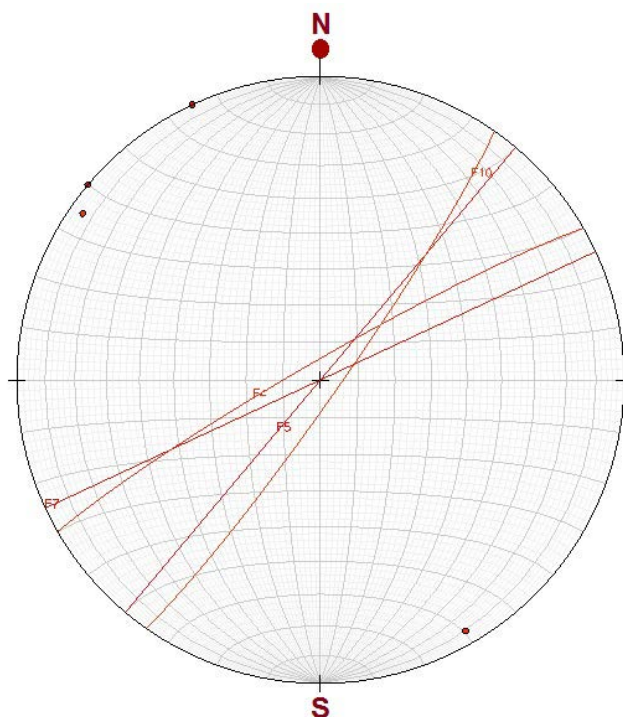


Figura 31. Projeção estereográfica das fraturas F4, F5, F7 e F10 da Face Livre A1.

Estas fraturas são as mais frequentes na Face Livre A1, com mergulho entre  $85^\circ$  e  $90^\circ$ , direção NE-SW, e influenciam na superfície trincante do bloco de partição natural da rocha.

A Projeção estereográfica das discontinuidades medidas na face exibe a obliquidade existente entre suas interseções (Figura 32). Há uma maior concentração dos seus polos no hemisfério norte, representados pelos pontos na Figura 32.

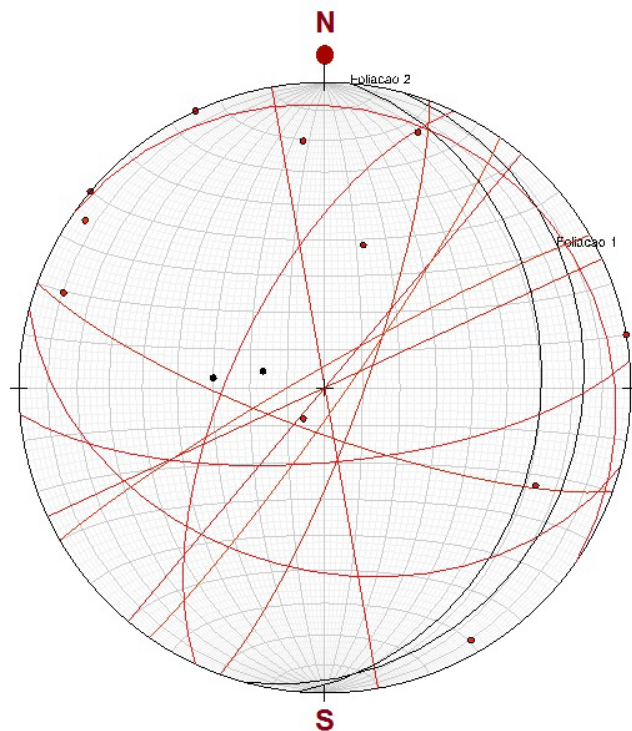


Figura 32. Projeção estereográfica das fraturas da Face Livre A1.

A Face Livre A1, com direção NE-SW, está aberta diagonalmente com as direções das foliações, e concordantemente com a direção das fraturas mais frequentes (Figura 33). As discontinuidades presentes na face indicam o comportamento frágil-rúptil de deformação.

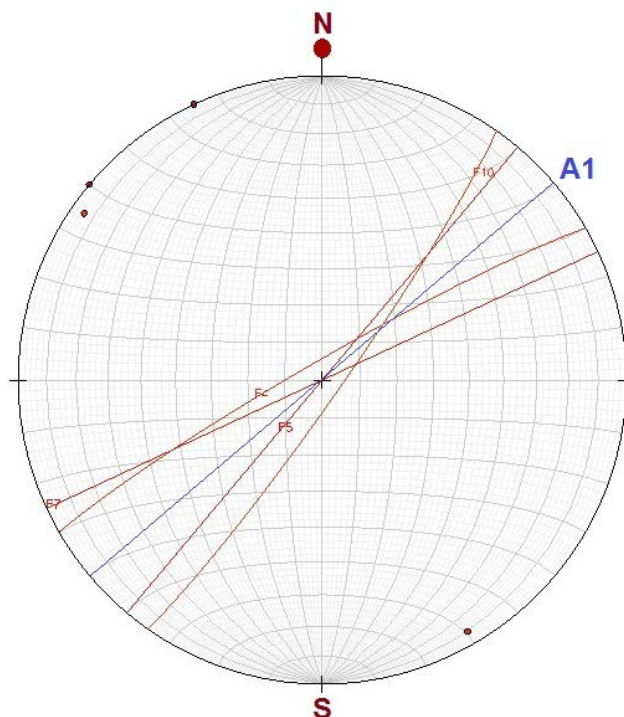


Figura 33. Projeção estereográfica da direção da Face Livre A1 e das fraturas F4, F5, F7 e F10.

A direção que favorece a abertura da face livre A1 é NNE-SSW, segundo a foliação que atua como superfície alongante. Essa direção permite otimizar a propagação da energia quando da detonação da rocha, pois é favorecida pela atitude das foliações e fraturas. Consequentemente, reduz o aparecimento dos taludes negativos que atualmente representam uma dificuldade em sua operacionalidade.

Através da análise estrutural, percebe-se a tendência do mergulho das discontinuidades para do sentido leste, sendo este a jusante, para oeste, à montante, ou seja, o melhor sentido de abertura da face é de leste para oeste, segundo a direção NNE-SSW. A Figura 34 apresenta uma fotografia da Face Livre A1, evidenciando a presença de taludes negativos em toda sua extensão.

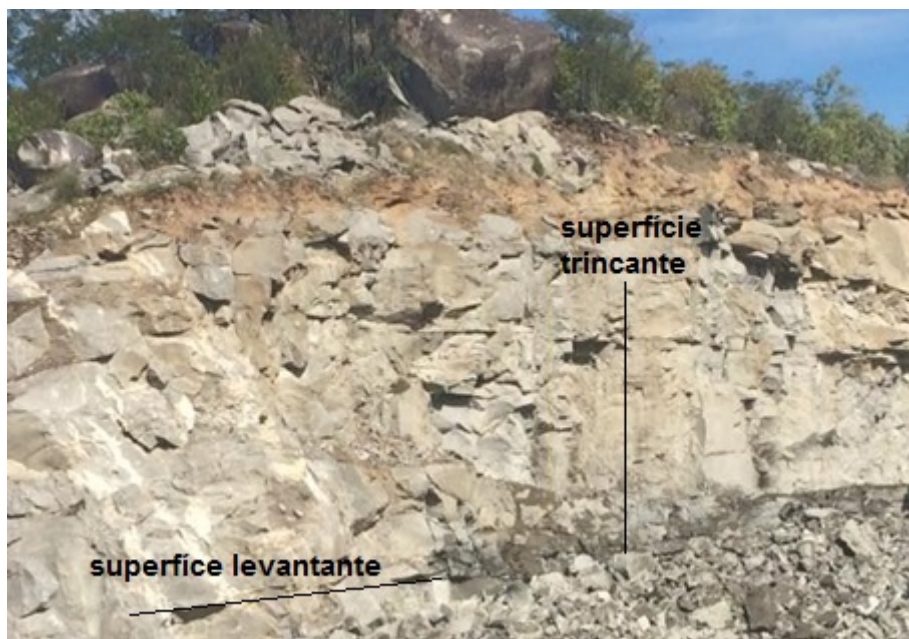


Figura 34. Taludes negativos e superfícies levantante e trincante da Face Livre A1.

A distribuição das estruturas combinada com a orientação da face modela diversos blocos em forma de cunha. Há a possibilidade de movimentação desses blocos, principalmente em cotas mais altas da face, o que reflete no risco às atividades realizadas na cava (Figura 35).



Figura 35. Fratura na Face Livre A1.

## 5.2. FACE LIVRE A2

A Face Livre A2 está orientada segundo a direção E-W, mergulhando de Norte para Sul, e se localiza de acordo com as coordenadas geográficas da Tabela 8. Possui cerca de 30 metros de extensão, com altura entre 15 e 18 metros, sendo parte da mesma bancada que a Face Livre A1, se diferenciando desta pela direção em que foi aberta. Está adjacente à rampa que dá acesso à cava.

Tabela 8. Coordenadas geográficas (*Datum* – SAD 69) localizadas na Face Livre A2.

|                                        |                                                    |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>PONTO 3</b><br><b>Face livre A2</b> | <b>07°56'42,3" Sul</b><br><b>36°09'17,9" Oeste</b> |
| <b>PONTO 4</b><br><b>Face livre A2</b> | <b>07°56'41,4" Sul</b><br><b>36°09'17,3" Oeste</b> |

A Tabela 9 apresenta os dados estruturais referentes às foliações contidas nesta face livre. A Figura 36 mostra a Projeção estereográfica destas foliações.

Tabela 9. Atitudes das foliações da Face Livre A2.

| <b>Elemento estrutural</b> | <b>Direção</b>                           | <b>Mergulho</b> |
|----------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| <b>Foliação 1</b>          | 010°Az – 190°Az<br>(N 10° E – S 10° W)   | 30°/100° Az     |
| <b>Foliação 2</b>          | 170°Az – 350°Az<br>(N 10° W – S 10° E)   | 05°/260° Az     |
| <b>Foliação 3</b>          | 130° Az – 310° Az<br>(N 50° W – S 50° E) | 50°/220° Az     |
| <b>Foliação 4</b>          | 085° Az – 265° Az<br>(N 85° E – S 85° W) | 45°/175° Az     |

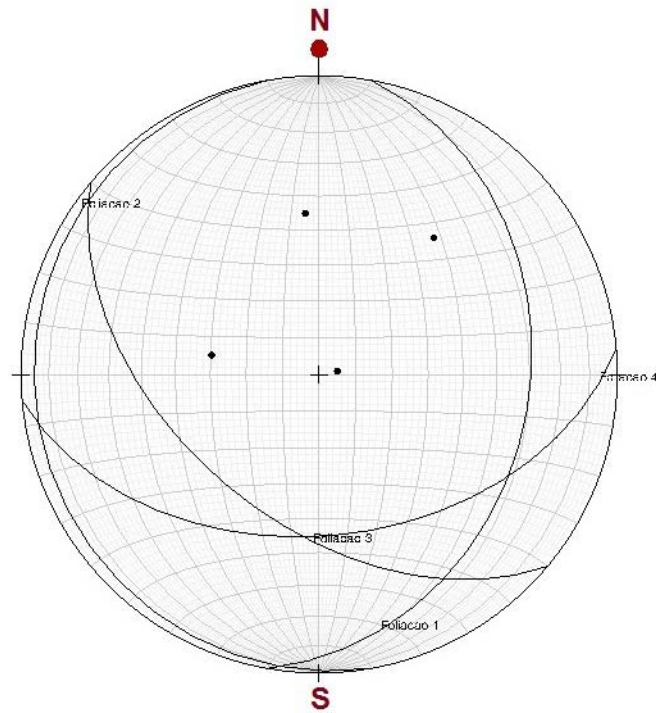


Figura 36. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre A2.

As foliações atuam como superfície levantante e alongante do bloco de partição natural do maciço nesta face e definem a orientação da rocha. Observa-se a diagonalidade entre elas, indicando a formação de blocos em cunha.

Também foram coletados os dados estruturais referentes às fraturas expostas da Face Livre A2 (Tabela 10), representadas graficamente na Figura 37.

Tabela 10. Dados das discontinuidades da Face Livre A2.

| Fratura    | Direção      | Mergulho    | Distância<br>d (cm) | Frequência<br>f (n°/m) |
|------------|--------------|-------------|---------------------|------------------------|
| <b>F1</b>  | 070°-250° Az | 80°/340° Az | $10 \leq d \leq 30$ | 2-4/m                  |
| <b>F2</b>  | 175°-355° Az | 55°/085° Az | $3 \leq d \leq 20$  | 4-5/m                  |
| <b>F3</b>  | 030°-210° Az | 50°/300° Az | $\approx 90$        | 2/m                    |
| <b>F4</b>  | 040°-220° Az | 65°/130° Az | $\geq 15$           | 4/m                    |
| <b>F5</b>  | 100°-280° Az | Vertical    | $\geq 30$           | 2-3/m                  |
| <b>F6</b>  | 020°-200° Az | 70°/290° Az | $\geq 40$           | 2/m                    |
| <b>F7</b>  | 065°-245° Az | 80°/335° Az | $\geq 30$           | 1-2/m                  |
| <b>F8</b>  | 010°-190° Az | 65°/100° Az | $\geq 15$           | 3/m                    |
| <b>F9</b>  | 050°-230° Az | 80°/140° Az | $\geq 8$            | 4-5/m                  |
| <b>F10</b> | 010°-190° Az | 70°/100° Az | $\geq 2$            | 4/m                    |
| <b>F11</b> | 060°-240° Az | 80°/330° Az | $\geq 15$           | 1-2/m                  |

|            |              |             |           |       |
|------------|--------------|-------------|-----------|-------|
| <b>F12</b> | 175°-355° Az | 60°/085° Az | $\geq 15$ | 1-2/m |
|------------|--------------|-------------|-----------|-------|

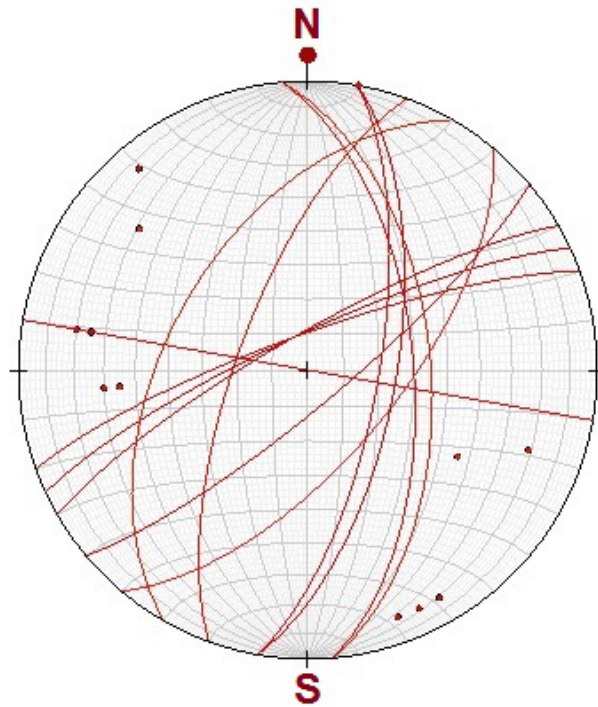


Figura 37. Projeção estereográfica das fraturas da Face Livre A2.

Observa-se que as fraturas F2 (175°Az – 250°Az), F4 (040°Az – 220°Az), F9 (050°Az – 230°Az) e F10 (010°Az – 190°Az) se apresentam como as mais frequentes, com cerca de 4 a 5 fraturas por metro, com mergulhos entre 55° e 70°, influenciando na superfície trincante do maciço (Figura 38).

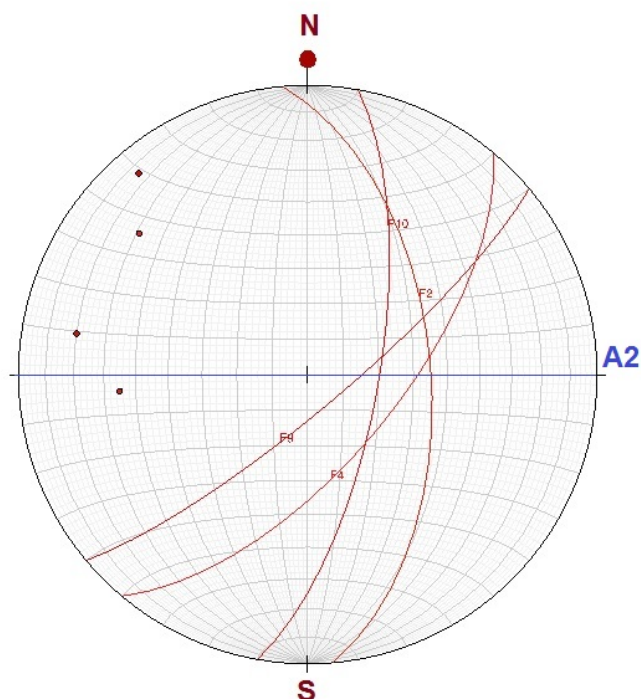


Figura 38. Projeção estereográfica da direção e das fraturas F2, F4, F9 e F10 da Face Livre A2.

As Figuras 36, 37 e 38, evidenciam a obliquidade entre as discontinuidades, com consequente formação de blocos em cunha, com tendência de deslizamento do sentido norte (montante) para sul (jusante), concordantemente com o sentido de abertura da face.

A direção de abertura da face (E – W), discordante das orientações das estruturas geológicas presentes, dificulta a propagação da energia quando da detonação da rocha, exigindo maiores quantidades de explosivos e consequentemente, aumentando os custos relacionados.

O sentido de abertura na prática (N – S) favorece a estabilidade da face. Pode-se dizer que a Face Livre A2 é mais segura, comparativamente à Face Livre A1, pois é aproximadamente transversal às foliações que determinam a superfície alongante.

A rocha nesta face pode ser classificada, através da análise em campo, como monzodiorito a quartzodiorito, conteúdo biotita, apresentando-se com textura inequigranular e levemente foliada. A rocha encaixante pode ser classificada como um gnaiss diorítico foliado.

Está cortada por veios que correspondem a cerca de 10% da face, com granulometria mais grossa, o que sugere uma menor alterabilidade, porém o preenchimento da rocha com

material mais claro, interrompe a reprodutibilidade das propriedades físicas e químicas do agregado graúdo, ou brita, a ser produzido com aquele material pétreo.

A Tabela 11 traz os dados relacionados aos veios que cortam a rocha encaixante (matriz escura) na Face Livre A2 e mostrado na Figura 39. Neste local, a rocha se encontra com bastante alterada, com granulometria dos cristais bastante diversificada.

Tabela 11. Atitudes dos veios da Face Livre A2.

| Elemento estrutural<br>(Veios) | Direção                                  | Mergulho    |
|--------------------------------|------------------------------------------|-------------|
| <b>Veio 1</b>                  | 005° Az – 185° Az<br>(N 05° E – S 05° W) | 65°/95° Az  |
| <b>Veio 2</b>                  | 090° Az – 270° Az<br>E – W               | 60°/180° Az |



Figura 39. Veios formados durante o estado reológico dúctil da rocha na Face Livre A2.

Observa-se também um veio com espessura aproximada de 5 metros, desenhando sigmoide (Figura 40). A rocha está dobrada, o que é apontado pelos diferentes sentidos de mergulho e pequena angularidade entre as direções das foliações, caracterizando o comportamento dúctil à frágil-dúctil do maciço neste local.



Figura 40. Veio cortando matriz rochosa na Face Livre A2.

### 5.3. FACE LIVRE B1

A Face Livre B1 está orientada segundo a direção E-W, possui cerca de 30 metros de comprimento e está disposta na cava paralelamente à Face Livre A2. A Tabela 12 apresenta suas coordenadas geográficas.

Tabela 12. Coordenadas geográficas (*Datum* – SAD 69) localizadas na Face Livre B1.

|                                        |                                                    |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| <b>PONTO 5</b><br><b>Face livre B1</b> | <b>07°56'42,3" Sul</b><br><b>36°09'17,9" Oeste</b> |
| <b>PONTO 6</b><br><b>Face livre B1</b> | <b>07°56'41,4" Sul</b><br><b>36°09'17,3" Oeste</b> |

As atitudes das foliações analisadas nesta face estão descritas na Tabela 13. A Foliação 1 (155°Az – 335°Az), mergulha 15° e atua como superfície levantante do bloco de partição natural do maciço. A Foliação 2 (040°Az – 220°Az), com mergulho de 85°, influencia na superfície alongante ou trincante do maciço dependendo da disposição das demais descontinuidades no local.

Tabela 13. Atitudes das foliações da Face Livre B1.

| Elemento estrutural | Direção                                  | Mergulho    |
|---------------------|------------------------------------------|-------------|
| <b>Foliação 1</b>   | 155° Az – 335° Az<br>(N 25° W – S 25° E) | 15°/245° Az |
| <b>Foliação 2</b>   | 040° Az – 220° Az<br>(N 40° E – S 40° W) | 85°/310° Az |

A Figura 41 apresenta a Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre B1.

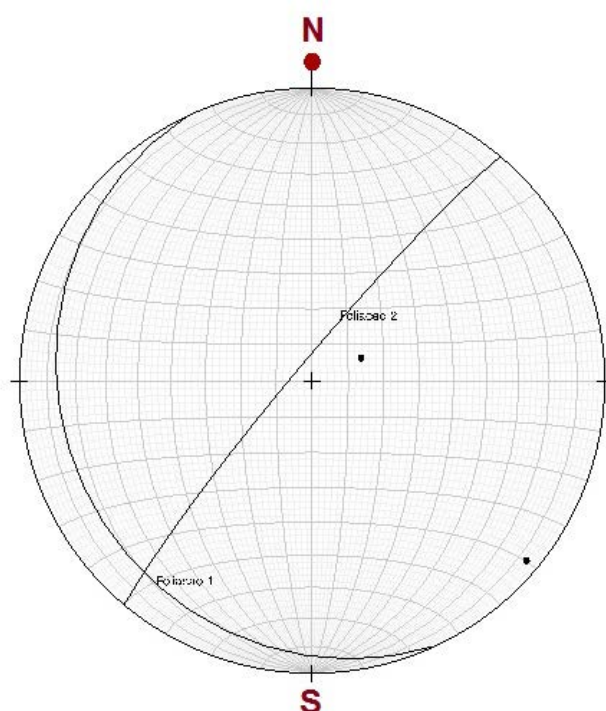


Figura 41. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre B1.

Os dados das fraturas presentes na Face Livre B1 estão dispostos na Tabela 14 e representadas no estereograma da Figura 42.

Tabela 14. Dados das descontinuidades da Face Livre B1.

| Fratura   | Direção      | Mergulho    | Distância<br>d (cm) | Frequência<br>f (n°/m) |
|-----------|--------------|-------------|---------------------|------------------------|
| <b>F1</b> | 070°-250° Az | 80°/160° Az | ≥ 20                | 4/m                    |
| <b>F2</b> | 020°-200° Az | 75°/110° Az | ≥ 1                 | 4/m                    |
| <b>F3</b> | 015°-195° Az | 55°/285° Az | ≥ 90                | 1/m                    |
| <b>F4</b> | 040°-220° Az | 85°/310° Az | ≥ 90                | 1/m                    |
| <b>F5</b> | 085°-265° Az | 80°/355° Az | ≥ 3                 | 4/m                    |

|            |              |             |           |       |
|------------|--------------|-------------|-----------|-------|
| <b>F6</b>  | 085°-265° Az | 70°/355° Az | $\geq 90$ | 1/m   |
| <b>F7</b>  | 110°-290° Az | 28°/200° Az | $\geq 20$ | 4/m   |
| <b>F8</b>  | 050°-230° Az | Vertical    | $\geq 40$ | 2/m   |
| <b>F9</b>  | 145°-325° Az | 56°/055° Az | $\geq 90$ | 1/m   |
| <b>F10</b> | 085°-265° Az | 80°/175° Az | $\geq 60$ | 2/m   |
| <b>F11</b> | 180°-360° Az | 80°/090° Az | $\geq 10$ | 5/m   |
| <b>F22</b> | 085°-265° Az | Vertical    | $\geq 90$ | 1/m   |
| <b>F13</b> | 060°-240° Az | Vertical    | $\geq 40$ | 1-2/m |
| <b>F14</b> | 015°-195° Az | Vertical    | $\geq 3$  | 4/m   |

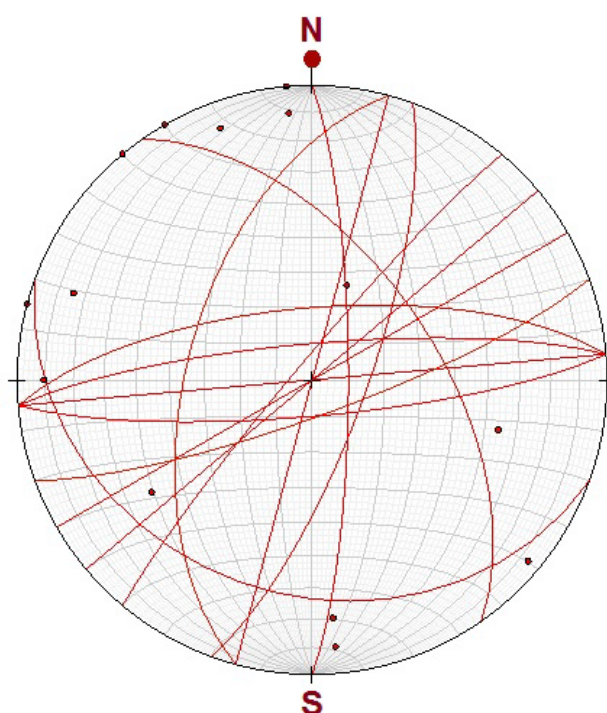


Figura 42. Projeção estereográfica das fraturas da Face Livre B1.

Observa-se que as fraturas F1 (070°Az – 250°Az), F2 (020°Az – 200°Az), F5 (085°Az – 265°Az), F7 (110°Az – 290°Az), F11 (180°Az – 360°Az) e F14 (015°Az – 195°Az), apresentam frequência de 4 a 5 fraturas por metro, com mergulho praticamente vertical (80° a 90°), atuando como superfície trincante, com exceção de F7, com mergulho fraco (28°). Estas fraturas estão representadas graficamente na Figura 43.

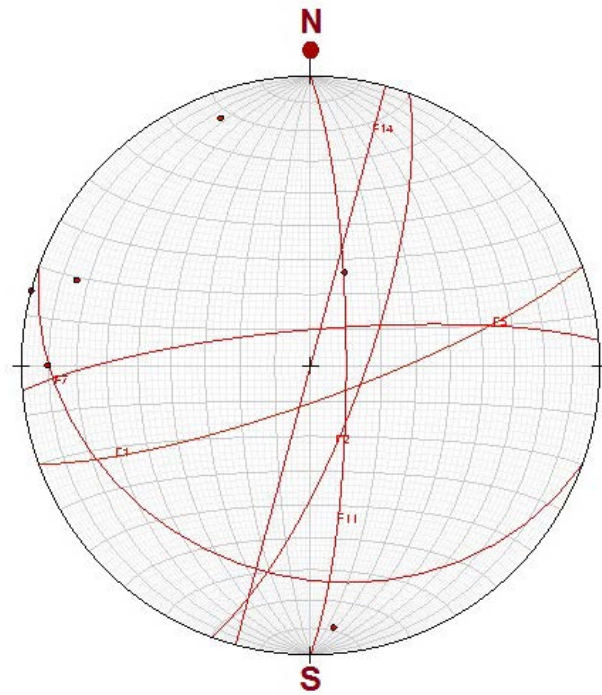


Figura 43. Projeção estereográfica da direção e das fraturas F1, F2, F5, F7, F11 e F14 da Face Livre B1.

As fraturas se mostram diagonais entre si, modelando bloco em forma de cunha. A maior parte delas mergulha do sentido sudeste para noroeste. A face com direção E – W, mergulha de sul para norte (Figura 44).

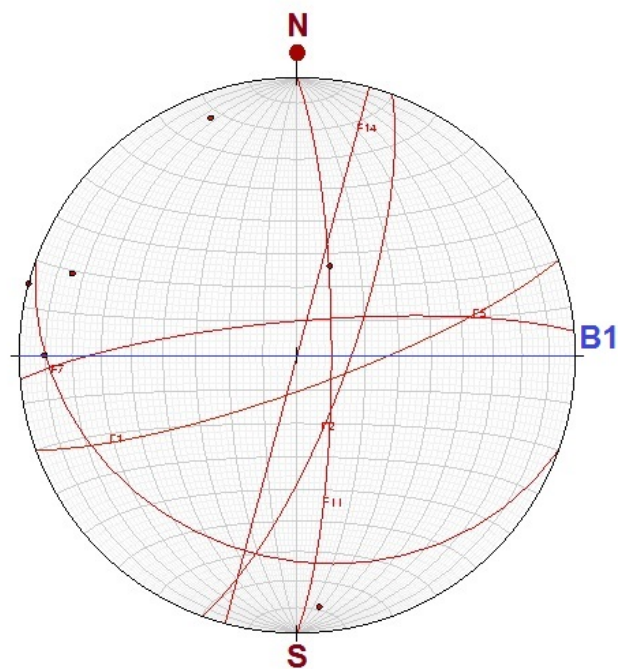


Figura 44. Projeção estereográfica da direção da Face Livre B1 e das fraturas F1, F2, F5, F7, F11 e F14.

Possui menor risco de taludes negativos, pois está orientada segundo a direção da superfície trincante (Figura 44).

Observa-se na Face Livre B1, a intensa presença de marcadores de deformação que caracterizam o comportamento dúctil a frágil-dúctil da rocha, como veios, enclaves e dobras, e que impedem a boa reprodutibilidade do maciço rochoso, diferenciando seu produto final (agregado) quanto à sua aplicação (Figura 45).



Figura 45. Veio com espessura máxima de 60 cm, caracterizando estado reológico dúctil na direção leste da Face Livre B1.

A Tabela 15 apresenta os dados estruturais dos veios presentes na Face Livre B1.

Tabela 15. Atitudes dos veios da Face Livre B1.

| <b>Marcadores de Deformação</b>              | <b>Direção</b>    | <b>Mergulho</b> |
|----------------------------------------------|-------------------|-----------------|
| <b>Veio Feldspático</b>                      | 165° Az – 345° Az | 50°/255° Az     |
|                                              | N 15° W – S 15° E |                 |
| <b>Veio Sigmóide<br/>(espessura ≈ 20 cm)</b> | 015° Az – 195° Az | 75°/105° Az     |
|                                              | N 15° E – S 15° W |                 |
| <b>Veio (espessura ≈ 1cm)</b>                | 105° Az – 285° Az | 50°/195° Az     |
|                                              | N 75° W – S 75° E |                 |

A rocha predominante, de coloração escura, ora é abundantemente cortada por minerais félsicos, conforme colocado anteriormente. Essa matriz, pode ser classificada como quartzodiorito a diorito, com enclaves de minerais claros, similares a monzonito inequigranular (com grãos menores que 5 mm) à pórfiro (grãos menores que 1,5 cm).

Há presença de veios feldspáticos com espessura centrimétrica à métrica, como mostra a Figura 45, e também apresenta dobras com eixo antifome (Figura 46). A Tabela 16 traz as atitudes das dobras presentes na Face Livre B1.



Figura 46. Dobra caracterizando o comportamento dúctil a frágil-dúctil, conforme os sigmoides, inclusive estirados.

Tabela 16. Atitudes das dobras da Face Livre B1.

| <b>Marcadores de Deformação</b> | <b>Direção</b>                           | <b>Mergulho</b> |
|---------------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| <b>Dobra 1</b>                  | 115° Az – 295° Az<br>(N 65° W – S 65° E) | 75°/105° Az     |
| <b>Dobra 2</b>                  | 180° Az – 360° Az<br>(N – S)             | 05°/270° Az     |

#### 5.4. FACE LIVRE B2

A Face Livre B2 está localizada segundo as coordenadas geográficas da Tabela 17. Está aberta segundo a direção N – S, do sentido E – S. Possui cerca de 130 metros de extensão. Encontra-se em operação atualmente, diferentemente das outras faces analisadas.

Tabela 17. Coordenadas geográficas (*Datum* – SAD 69) localizadas na Face Livre B2.

|                      |                          |
|----------------------|--------------------------|
| <b>PONTO 7</b>       | <b>07°56'40,4" Sul</b>   |
| <b>Face livre B2</b> | <b>36°09'17,8" Oeste</b> |
| <b>PONTO 8</b>       | <b>07°56'44,5" Sul</b>   |
| <b>Face livre B2</b> | <b>36°09'17,8" Oeste</b> |

A Tabela 18 apresenta os dados estruturais das foliações da Face B2.

Tabela 18. Atitudes das foliações da Face Livre B2.

| <b>Elemento estrutural</b> | <b>Direção</b>                           | <b>Mergulho</b> |
|----------------------------|------------------------------------------|-----------------|
| <b>Foliação 1</b>          | 100° Az – 280° Az<br>(N 80° W – S 80° E) | 15°/190° Az     |
| <b>Foliação 2</b>          | 130° Az – 310° Az<br>(N 50° W – S 50° E) | 40°/040° Az     |

A Foliação 1 (100°Az – 280°Az), com mergulho de 15°, atua como superfície levantante do bloco de partição. A Foliação 2 (130°Az – 310°Az), com mergulho de 40°,

influencia na superfície alongante do bloco, indicando a melhor direção para a abertura da face neste local. A Figura 47 mostra a Projeção estereográfica dessas foliações.

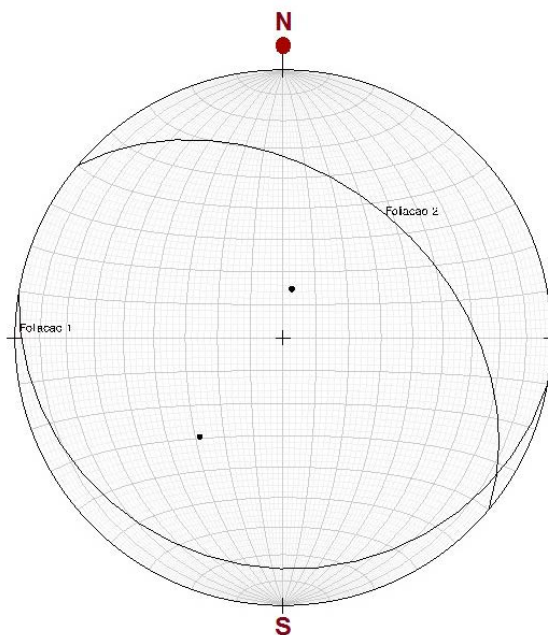


Figura 47. Projeção estereográfica das foliações presentes na Face Livre B2.

A Tabela 19 traz as atitudes das fraturas medidas na Face Livre B2 e estão representadas no estereograma da Figura 48.

Tabela 19. Dados das descontinuidades da Face Livre B2.

| Fratura   | Direção      | Mergulho    | Distância<br>d (cm) | Frequência<br>f (n°/m) |
|-----------|--------------|-------------|---------------------|------------------------|
| <b>F1</b> | 040°-220° Az | Vertical    | ≥ 40                | 1-2/m                  |
| <b>F2</b> | 130°-310° Az | 60°/220° Az | ≥ 15                | 3/m                    |
| <b>F3</b> | 070°-250° Az | 30°/160° Az | ≥ 15                | 3-4/m                  |
| <b>F4</b> | 070°-250° Az | 75°/340° Az | ≥ 60                | 2/m                    |
| <b>F5</b> | 175°-355° Az | 85°/265° Az | ≥ 30                | 2/m                    |
| <b>F6</b> | 090°-270° Az | 70°/180° Az | ≥ 20                | 2-3/m                  |
| <b>F7</b> | 110°-290° Az | 70°/200° Az | ≥ 90                | 1/m                    |
| <b>F8</b> | 105°-285° Az | 80°/015° Az | ≥ 90                | 1/m                    |

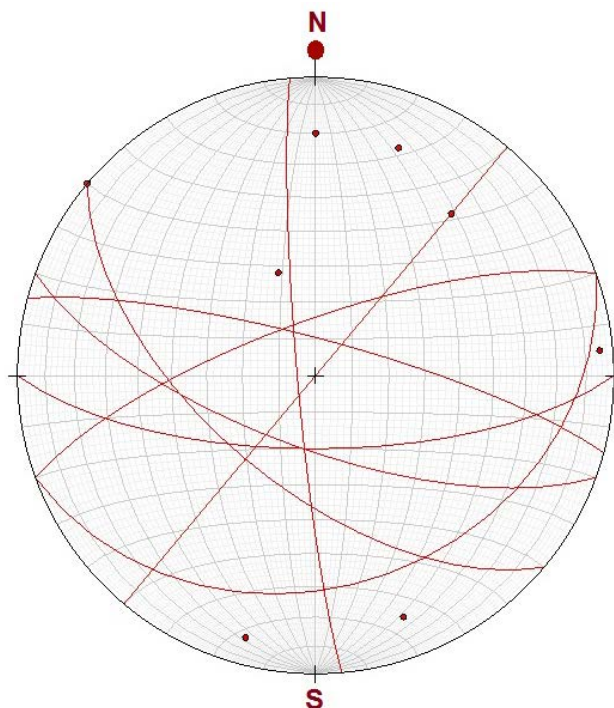


Figura 48. Projeção estereográfica das fraturas presentes na Face Livre B2.

Observa-se de acordo com a Tabela 19 que as fraturas F2 ( $130^{\circ}\text{Az} - 310^{\circ}\text{Az}$ ), F3 ( $070^{\circ}\text{Az} - 250^{\circ}\text{Az}$ ) e F6 ( $090^{\circ}\text{Az} - 270^{\circ}\text{Az}$ ), com mergulhos entre  $30^{\circ}$  e  $65^{\circ}$ , influenciam na superfície alongante e trincante do maciço rochoso nesta face (Figura 49).

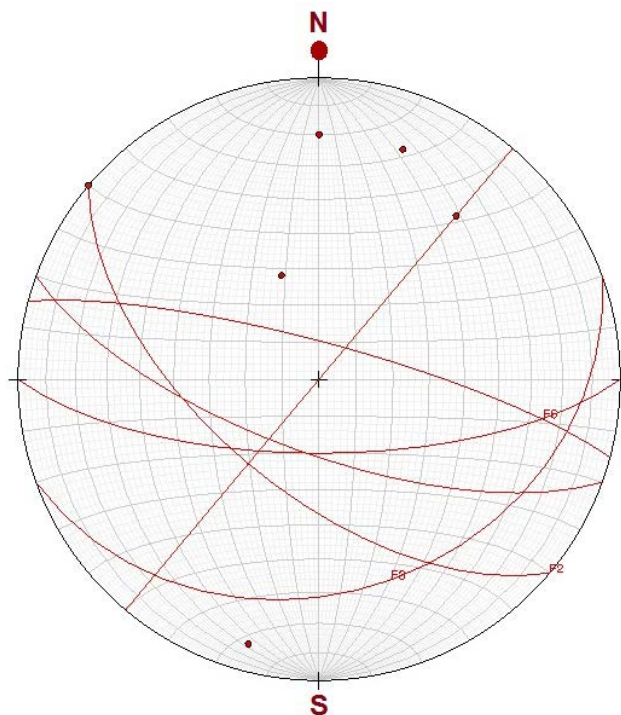


Figura 49. Projeção estereográfica da direção e das fraturas F2, F3, F6 da Face Livre B2.

A Figura 50 mostra a projeção estereográfica das fraturas mais frequentes da face (F2, F3, F6) e a sua direção de abertura. Observa-se sua direção (N – S), não se aproveita das orientações das descontinuidades presentes na mesma. A distribuição das estruturas combinadas com a orientação da face, forma diversos bloco em cunha (Figuras 48, 49 e 50).

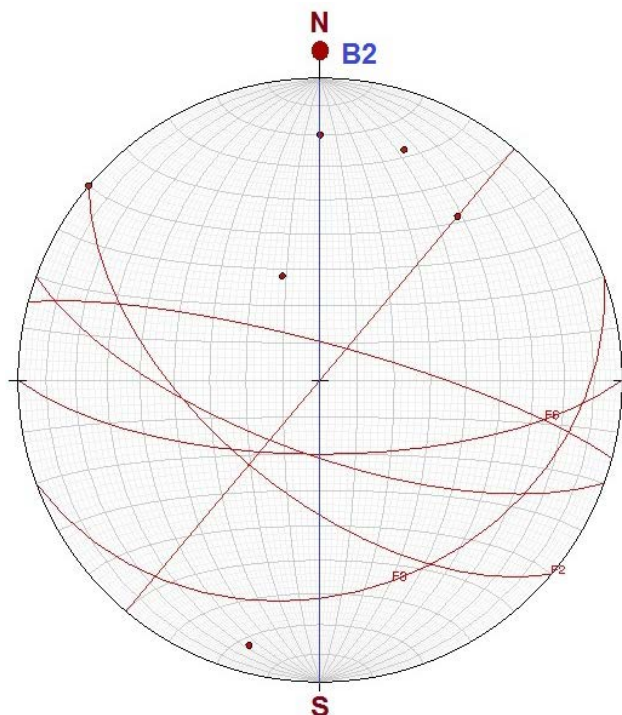


Figura 50. Projeção estereográfica da direção da Face Livre B1 e das fraturas F1, F2, F3 e F6.

A rocha pode ser classificada como um monzosienito com silicificação milimétrica em algumas fraturas (Figura 51). Apresenta material de boa qualidade para a produção de agregados, sendo caracterizada pelo comportamento frágil. Não foram identificados marcadores de deformação que indiquem comportamento dúctil na face, diferente das analisadas anteriormente.



Figura 51. Face Livre B2 da pedreira Combritas.

As discontinuidades presentes na face, com mergulho preferencialmente para sudoeste, indicam que o melhor sentido de abertura é de sudoeste para noroeste, porém a mesma se encontra orientada diagonalmente à estas fraturas, não se favorecendo totalmente dessas orientações quando da sua operação para lavra.

A Face Livre B2 é a que proporciona menores custos, devido a sua orientação e sentido de abertura de NE-SW. Representa menores riscos de taludes negativos, porém, devido ao alto grau de fraturamento do maciço, algumas dificuldades podem surgir, como a presença de repés nas cotas inferiores da face (Figura 51).

#### 5.5. FACE LIVRE C

A Face Livre C é externa à cava e está orientada segundo a direção NNE-SSW, possuindo cerca de 15 metros de extensão. A Tabela 20 apresenta as coordenadas geográficas que localizam a face.

Tabela 20. Coordenadas geográficas (*Datum* – SAD 69) localizadas na Face Livre C.

|                     |                          |
|---------------------|--------------------------|
| <b>PONTO 8</b>      | <b>07°56'45,4" Sul</b>   |
| <b>Face livre C</b> | <b>36°09'17,2" Oeste</b> |
| <b>PONTO 9</b>      | <b>07°56'45,8" Sul</b>   |
| <b>Face livre C</b> | <b>36°09'17,1" Oeste</b> |

A análise estrutural nesta face foi realizada apenas no trecho mais acessível. Não foram identificadas foliações. Os dados coletados das fraturas analisadas estão dispostos na Tabela 21.

Tabela 21. Dados das descontinuidades da Face Livre C.

| <b>Fratura</b> | <b>Direção</b> | <b>Mergulho</b> | <b>Distância<br/>d (cm)</b> | <b>Frequência<br/>f (n°/m)</b> |
|----------------|----------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>F1</b>      | 120°-300° Az   | 05°/030° Az     | ≥ 40                        | 2/m                            |
| <b>F2</b>      | 080°-260° Az   | 80°/350° Az     | ≥ 20                        | 3/m                            |
| <b>F3</b>      | 025°-205° Az   | Vertical        | ≥ 15                        | 4/m                            |
| <b>F4</b>      | 050°-230° Az   | Vertical        | ≥ 90                        | 1/m                            |
| <b>F5</b>      | 110°-290° Az   | 65°/020° Az     | ≥ 8                         | 6/m                            |
| <b>F6</b>      | 070°-250° Az   | 30°/160° Az     | ≥ 20                        | 4/m                            |
| <b>F7</b>      | 095°-275° Az   | 80°/005° Az     | ≥ 20                        | 3/m                            |

A Figura 52 apresenta a Projeção estereográfica das fraturas descritas acima.

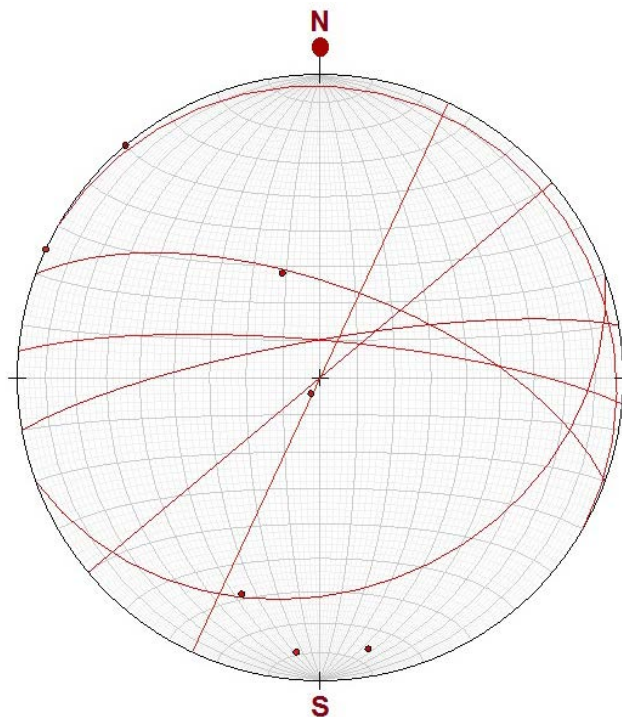


Figura 52. Projeção estereográfica das fraturas presentes na Face Livre C.

Observa-se na Figura 52, as fraturas F3 ( $025^{\circ}\text{Az} - 205^{\circ}\text{Az}$ ) e F5 ( $050^{\circ}\text{Az} - 230^{\circ}\text{Az}$ ), se comportam como fraturas de Riedel, um sistema de falhas conjugadas formadas pelo movimento de camadas de rochas subjacente na qual, em perfil exibe uma forma em V da zona de cisalhamento.

O maciço nesta face apresenta comportamento frágil, com as fraturas mais frequentes sendo F3 ( $025^{\circ}\text{Az} - 205^{\circ}\text{Az}$ ), F5 ( $110^{\circ}\text{Az} - 290^{\circ}\text{Az}$ ) e F6 ( $30^{\circ}\text{Az} - 250^{\circ}\text{Az}$ ), representadas no estereograma da Figura 53.

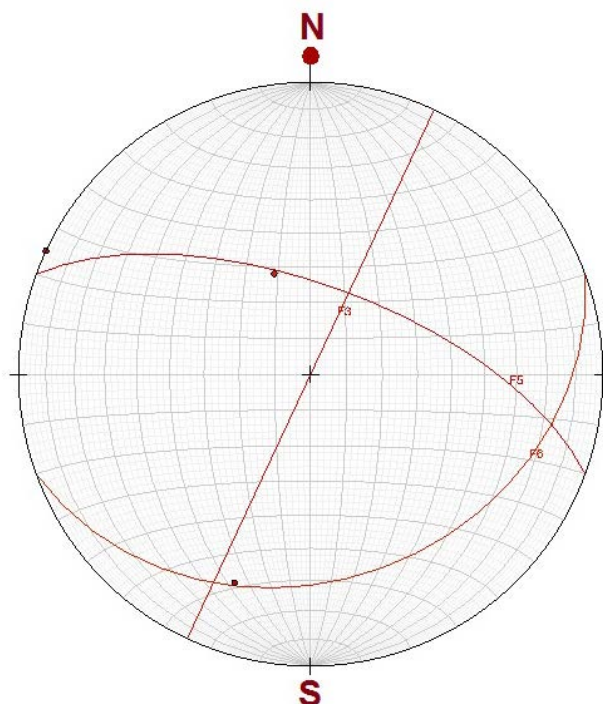


Figura 53. Projeção estereográfica das fraturas F3, F5 e F6 da Face Livre C.

As fraturas com mergulho mais fraco (F1 e F6), irão influenciar na superfície levantante do bloco de partição. A fratura F5, com frequência de 6 por metro, influenciará na superfície alongante do maciço, traduzindo-se como uma indicação de orientação para a abertura da face.

A projeção estereográfica das fraturas (Figura 52) mostra a diagonalidade entre elas, formando blocos em cunha. O sentido de abertura da face (NNE-SSW) se aproveita da orientação das fraturas F3 e F5, concordando com a superfície alongante do bloco de partição natural do maciço rochoso (Figura 54). Isso influenciará na otimização dos custos relacionados às operações realizadas na face, sendo importante para a otimização do desmonte e redução de custos.

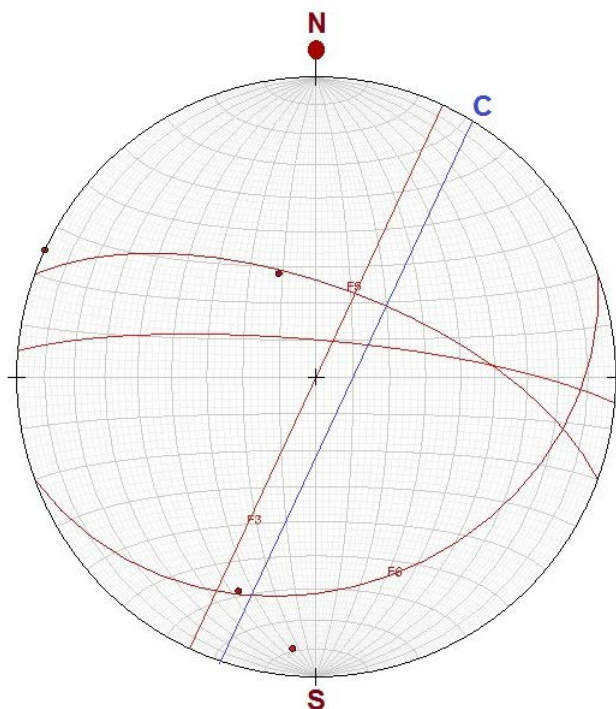


Figura 54. Projeção estereográfica da direção da Face Livre C e das fraturas F3, F5 e F6.

A rocha foi identificada em análise de campo como monzosienito com silicificação milimétrica e sem marcadores de deformação (Figura 55) que indiquem comportamento dúctil, garantindo a reprodutibilidade do maciço e das características do produto final (agregado). Possui potencial de exploração e está sendo melhor explorada atualmente, como alternativa á operação na Face Livre B2.



Figura 55. Trecho da Face Livre C.

## 6. CONCLUSÃO

A análise estrutural com base nos dados obtidos em campo possibilitou reconhecer as características das descontinuidades da pedra Combritas. As informações e interpretações geradas serão úteis à orientação das faces livres da mina e sua operacionalidade.

Para a operacionalidade da Face Livre A1, orientada segundo a direção NE-SW, observa-se que esta indica menores custos relacionados quando comparada com a Face livre A2, pois está em melhor concordância com as atitudes das descontinuidades locais, porém, é menos segura, com bastante taludes negativos, pois não se aproveitou das orientações das descontinuidades presentes no local.

A Face Livre A2 tem direção E-W e foi desenvolvida do sentido norte para sul. Não se apresenta como uma boa alternativa para produção de agregados, devido à intensa presença dos marcadores de deformação de comportamento dúctil, principalmente veios, representando uma dificuldade na reprodutibilidade das propriedades do material pétreo. Adicionalmente, foi aberta transversalmente à superfície alongante, tornando mais onerosa sua operação.

A Face Livre B1, analogamente à A2, apresenta menores riscos quanto ao surgimento de taludes negativos, pois seu sentido de abertura, de jusante para montante, concorda com as orientações das descontinuidades. A face está aberta segundo a direção da fratura que influencia na superfície trincante. A intensa presença de veios e sigmoides interfere na reprodutibilidade das propriedades do maciço.

A Face Livre B2 possui orientação N-S, desenvolvida no sentido de leste para oeste, desde jusante para montante, do que resulta melhor concordância com as atitudes das descontinuidades mais frequentes, isto é, superfície alongante do maciço rochoso. Essa orientação indica uma melhor operacionalidade e redução nos custos, menores riscos de taludes negativos, porém apresenta repés, onde a rocha tem dificuldade em se desprender. Apresenta boa reprodutibilidade do material pétreo, sem presença de marcadores de deformação de comportamento dúctil.

A Face Livre C apresenta potencial de exploração, com boa reprodutibilidade quanto às propriedades do maciço rochoso, observado em campo. Está aberta segundo a direção da superfície alongante, a qual otimiza sua operacionalidade. Porém, foi aberta de montante para jusante, e consequentemente, apresenta taludes negativos.

A projeção estereográfica é uma ferramenta prática e usual para a orientação das aberturas das faces livres e análise de descontinuidades em minerações à céu aberto, fornecendo uma visualização das intersecções entre as famílias de descontinuidades e do modo de ruptura do bloco de rocha.

Em todas as faces identifica-se a ruptura em cunha do maciço, reafirmando a necessidade de se realizar a análise contínua para otimização de suas orientações. Há obliquidade entre a foliação da rocha e as famílias de fraturas mais frequentes, traduzindo-se, em geral, com alongamentos segundo a direção NNW-SSE até NE-SW, com mergulhos para o sentido leste do que se conclui que a abertura da face livre será otimizada se respeitar a direção daquele alongamento, mergulhando do sentido leste para oeste. Alternativamente, deve ser respeitada a direção da superfície alongante da rocha, de tal modo que a face livre verticalizada, nessa situação, deverá gerar menos taludes negativos e passivos ambientais.

A coleta dos dados em campo buscou gerar informações suficientes para o conhecimento do padrão geral de fraturamento do maciço, o que possibilitará práticas sustentáveis de lavra e melhores resultados operacionais. A análise estrutural deve ser utilizada continuamente no planejamento da lavra, a fim de minimizar riscos e custos, buscando otimizar o conjunto de operações desenvolvidas na pedreira.

## REFERÊNCIAS

- ABGE/CBMR. Métodos para a descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos ABGE/CBMR, São Paulo, SP 132p, 1983.
- ABGE. Geologia de Engenharia, Caracterização e Classificação dos Maciços Rochosos, São Paulo, p.211- 226, 2011.
- ARAÚJO, César Vale de Araújo. Marcadores de deformação com determinação do bloco de partição em pedreiras na região metropolitana do Recife. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco.
- BARTON, N.; LIEN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Wien, 6, (4) : 189 – 236, 1974.
- BAUTISTA, Leonardo Erik Chávez. Influência das tensões de origem térmica em problemas de estabilidade de blocos rochosos. 2007. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- BIENIAWSKI, Z. T. Design Methodology in Rock Engineering. Balkema. 1992.
- \_\_\_\_\_, Z. T.; ORR C. M. Rapid site appraisal for dam foundations by the geomechanics classification. *Proc. 12 th Int. Cong. On Large Dams. I COLD*, México Q 46, R 32 pp. 483 – 501, 1976.
- \_\_\_\_\_, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. *Pro. Of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, Nov. p. 97 – 106, 1976.
- \_\_\_\_\_, Z. T. Tunnel design rock mass classifications. *Pennsylvania State University, Department of Mineral Engineering, University Park Technical report G1 – 79 – 19*, 1979.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico. 2001.
- FIGUEIREDO, José Miguel Vilela. Aplicação de análise estrutural para orientação d lavra do sienito Café Imperial. 2014. 41 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais.
- FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas. 2. ed. rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009.
- FOSSSEN, H. Geologia Estrutural. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- FREITAS, Sílvia Bruno Nóbrega. Caracterização geomecânica e classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de maciços rochosos em taludes do Funchal. Universidade da Madeira, 2014. [Dissertação]. Disponível em:  
<<http://digituma.uma.pt/bitstream/10400.13/601/1/MestradoS%C3%ADlvioFreitas.pdf>>. Acesso em: 10 de abr. 2016

GUIDICINI, G; SANTOS OLIVEIRA, A.M; PIRES DE CAMARGO ,F.;KAJI, N.), Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos. In: Semana Paulista de Geologia Aplicada Anais. São Paulo. P 275-282, 1972.

ISRM .Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM – Suggested Methods.E.T Brown (ed), pergamon,Oxford,England,211p,1981.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description os discontinuities in rock mechanics. International Journal of rock mechanics Science and geomechanics.Abstract V.15p. 319-368, 1978.

POLLARD, David D.; FLETCHER, Raymond C.. Fundamentals of Structural Geology, Cambridge University Press, Cambridge, England, 500 pp.

RAGAN, D.M. Structural Geology: An Introduction to Geometrical Techniques. 4. ed. Nova York: Cambridge University Press, 2009.

ROWLAND, Stephen; DUEBENDORFER, Ernest. Structural Analysis and Synthesis a Laboratory Course in Structural Geology. 1994, 2 Ilustrada. pp. 279. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books/about/Structural\\_Analysis\\_and\\_Synthesis\\_A\\_Labo.html?id=ptPU\\_2IbQUwC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/Structural_Analysis_and_Synthesis_A_Labo.html?id=ptPU_2IbQUwC&redir_esc=y)>. Acesso em: 10 de abr. 2016

RUEDA, Jenny; MADERO, Hernan; CALDERÓN, Zully; SAAVEDRA, Néstor; OJEDA, Germán; ORTIZ, Alberto; Piedrahita, Carlos. METODOLOGÍA PARA DETERMINAR DENSIDAD DE MICROFRACTURAS EN ROCAS, A PARTIR DE PARÁMETROS ANISÓTROPAS: UNA APROXIMACIÓN EN NÚCLEOS SINTÉTICOS. bol.geol. [online]. 2010, vol.32, n.1, pp.79-93. ISSN 0120-0283.

SALAMUNI, Eduardo. Regimes Processos de Deformação. Conjunto Aula 03. UFPR. Disponível em: <<http://www.geologia.ufpr.br/graduacao2/estrutural/Aula3REGIMESPROCESSOSDEDEFORMACAO.pdf>>. Acesso em: 10 de abr. 2016

\_\_\_\_\_, Eduardo. Zonas de Cisalhamento. Conjunto Aula 04. UFPR. Disponível em: <<http://www.geologia.ufpr.br/graduacao2/estrutural/Aula4ZONASDECISALHAMENTO.pdf>>. Acesso em: 10 de abr. 2016

UNIVERSIDADE DO MINHO. Deformação. Seção: Glossario. Disponível em: <<http://www.dct.uminho.pt/pnpg/gloss/deformacao.html>>. Acesso em: 10 de abr. 2016