



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



ANÁLISE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS DESCONTINUIDADES DE
UMA MINA À CÉU ABERTO: CARACTERIZAÇÃO, TRATAMENTO
ESTATÍSTICO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

por
Simone Aparecida Simim Moreira

Milene Sabino Lana - Orientadora

Ouro Preto – 19 de julho de 2019

SIMONE APARECIDA SIMIM MOREIRA

ANÁLISE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS DESCONTINUIDADES DE
UMA MINA À CÉU ABERTO: CARACTERIZAÇÃO TRATAMENTO
ESTATÍSTICO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Ouro Preto como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Estabilidade de taludes.

Orientadora: Profa. Dra. Milene Sabino Lana

OURO PRETO
2019

M838a Moreira, Simone Aparecida Simim .
Análise geológico-geotécnica das descontinuidades de uma mina à céu aberto [manuscrito]: caracterização, tratamento estatístico e definição de parâmetros / Simone Aparecida Simim Moreira. - 2019.

99f.: il.: color; tabs.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Milene Sabino Lana.

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

1. Lavra a céu aberto. 2. Geotecnia. 3. Cinemática. 4. Métodos estatísticos. I. Lana, Milene Sabino. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.015:519.23

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO


Aos 19 dias do mês de julho de 2019, às 10h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“ANÁLISE GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS DESCONTINUIDADES DE UMA MINA A CÉU ABERTO: CARACTERIZAÇÃO, TRATAMENTO ESTATÍSTICO E DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS”**, pela aluna **Simone Aparecida Simim Moreira**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof.ª Dr.ª Milene Sabino Lana (orientadora)**, **Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández** e **M.Sc. Karla Baêta e Souza**.

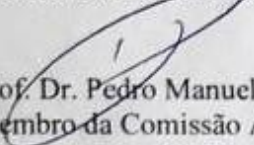
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO**... da candidata, com a nota **9,5**... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

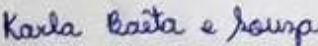
A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após o depósito, no site do Repositório UFOP, da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

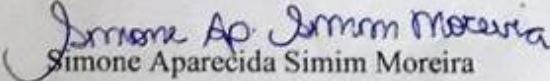
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.


Ouro Preto, 19 de julho de 2019.


Prof.ª Dr.ª Milene Sabino Lana
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientadora


Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández
Membro da Comissão Avaliadora


M.Sc. Karla Baêta e Souza
Membro da Comissão Avaliadora


Simone Aparecida Simim Moreira


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me guiar nas minhas escolhas e me permitir realizá-las da melhor maneira possível. Agradeço também a Ele por me dar essa oportunidade de estar novamente concluindo um curso de graduação em uma universidade pública.

Agradeço aos meus pais por acreditarem mais uma vez nessa “loucura” e me apoiarem em todas as minhas escolhas e sempre por estarem perto nos melhores e piores momentos da minha vida.

Agradeço também a Ana Flávia, ao Pedro, a Bruna e ao Antônio Fernando por me auxiliarem na execução dessa pesquisa.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso.

Agradeço ao DEMIN e a todos os professores desse departamento por serem tão leves e em especial a Prof^ª Milene pela oportunidade de aprendizado e aprofundamento nos meus conhecimentos geotécnicos.

*“Você nunca sabe que resultados
virão da sua ação, mas se você não
fizer nada não existirão resultados.”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

Comumente na mineração se vê casos de rupturas de taludes em cavas que acabam trazendo prejuízos financeiros para as mineradoras, com a paralização das atividades, perdas e danos em equipamentos e até mesmo perda de vidas humanas. Essas rupturas, quando ocorrem em rochas, estão condicionadas a presença de descontinuidades nos maciços e a interação dessas com a inclinação da face do talude. Nesse sentido é importante caracterizar e entender o comportamento das descontinuidades para compreender os possíveis mecanismos de rupturas. Sendo assim, esse trabalho analisou o comportamento de 2331 dados de descontinuidades, quanto à persistência, espaçamento, abertura, preenchimento, grau de alteração, rugosidade das paredes e resistência. As famílias das descontinuidades foram definidas usando os *software* Heurística e o *Dips*. Ainda, foi feita a análise estatística da variável espaçamento para tentar encontrar qual tipo de distribuição essa variável segue. Para tal, foi utilizado o *software* R e os testes estatísticos feitos foram o KS, Shapiro-Wilk e Qui-quadrado para as distribuições normal, lognormal, exponencial, Weibull e Gama. Além disso, foram determinados alguns parâmetros dos critérios de resistência de Hoek-Brown e Barton-Bandis para um setor específico da cava em estudo. A escolha por esse setor se deve a uma ruptura que ocorreu nesse local em 2013, que paralisou as atividades da mineração por um ano. Para esse mesmo setor foi realizada as análise cinemáticas para as rupturas em cunha, planar, tombamento de blocos e flexural, usando o *software* *Dips*, da Rocscience. Ao fim, conclui-se que os maciços dessa cava são resistentes e pouco alterados e o mecanismo de ruptura com maior probabilidade foi o tombamento de blocos. Quanto à distribuição estatística, os dados do espaçamento não seguem nenhuma das distribuições que foram consideradas.

PALAVRAS CHAVES: Descontinuidades, Famílias, Análise Cinemática, Testes Estatísticos, Heurística, *Dips*.

ABSTRACT

Commonly in the mining sector one sees cases of ruptures of slopes in open pits that end up bringing financial damages, with the paralysis of the activities, losses and damages in equipment and even loss of human lives. These ruptures, when occurring in rocks, are conditioned the presence of discontinuities in the rocks and the interaction of these with the inclination of the face of the slope. In this sense it is important to characterize and understand the behavior of the discontinuities to understand the possible rupture mechanisms. Thus, this work analyzed the behavior of 2331 discontinuity data regarding persistence, spacing, aperture, fill, degree of weathering, wall roughness and resistance. The families of the discontinuities were defined using the software Heuristica and *Dips*. Also, the statistical analysis of the variable spacing was done to try to find out what type of distribution this variable follows. For this, *R* software was used and the statistical tests were KS, Shapiro-Wilk and Chi-square for the normal, lognormal, exponential, Weibull and Gamma distributions. In addition, some parameters of the Hoek-Brown and Barton-Bandis resistance criteria were determined for a specific sector of the pit under study. The choice for this sector is due to a rupture that occurred in that place in 2013, which paralyzed mining activities for a year. For this same sector, the kinematic analyzes were performed for wedge, planar, block tipping and flexural ruptures using *Dips* software. At the end, it is concluded that the pit rocks are resistant and little altered and the mechanism of rupture with more probability was the blocking of blocks. As for the statistical distribution, the spacing data does not follow any of the distributions that were considered.

KEYWORDS: Discontinuities, Families, Kinematic Analysis, Statistical Tests, Heurística, *Dips*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de orientação de uma descontinuidade.	6
Figura 2: Perfil de rugosidade.....	8
Figura 3: Classificação GSI.	17
Figura 4: Estimativa do JRC.....	19
Figura 5: Esquema de ruptura planar e estereograma representando a condição estrutural para esse evento.	20
Figura 6: Formação de uma cunha de rocha pela interseção de dois planos e o estereograma representando a condição estrutural para uma ruptura em cunha.....	21
Figura 7: Formação de blocos de rocha e estereograma representando a condição estrutural para uma ruptura por tombamento.	22
Figura 8: Mapa Geológico da região sul do QF. Região sul está inserida a mina em estudo.	23
Figura 9: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.	24
Figura 10: Cava da mina vista de sudeste para noroeste.	25
Figura 11: Exemplo da distribuição Normal.....	26
Figura 12: Exemplo da distribuição Lognormal.	26
Figura 13: Exemplo da distribuição Weibull.....	27
Figura 14: Exemplo da distribuição exponencial.....	27
Figura 15: Exemplo da distribuição gama.	28
Figura 16: Diagrama de frequência dos polos referentes aos 2331 dados, feito no <i>Dips</i> da <i>Rocscience</i>	31
Figura 17: Distribuição de polos da família 1 realizada no <i>Dips</i>	34
Figura 18: Distribuição de polos da família 2 realizada no <i>Dips</i>	35
Figura 19: Distribuição de polos da família 3 realizada no <i>Dips</i>	37
Figura 20: Distribuição de polos da família 4 realizada no <i>Dips</i>	38
Figura 21: Histograma de distribuição de litologia das descontinuidades da família 4.	38
Figura 22: Distribuição de polos da família 5 realizada no <i>Dips</i>	39
Figura 23: Distribuição de polos da família 6 realizada no <i>Dips</i>	41
Figura 24: Distribuição de polos da família 7 realizada no <i>Dips</i>	42
Figura 25: Representação gráfica dos dados do espaçamento em <i>box plot</i>	45
Figura 26: Histograma dos dados do espaçamento.....	46

Figura 27: Gráfico da distribuição normal dos dados.....	47
Figura 28: Resultado para distribuição normal usando o teste Shapiro-Wilk.	47
Figura 29: Resultado do teste estatístico KS para distribuição normal.	47
Figura 30: Gráficos da distribuição lognormal dos dados.	48
Figura 31: Resultado do teste KS para a distribuição LogNormal.	48
Figura 32: Resultado do teste Shapiro-Wilk para a distribuição LogNormal.....	48
Figura 33: Gráfico da distribuição Weibull dos dados.	49
Figura 34: Resultado do teste Qui-quadrado para a distribuição de Weibull.	49
Figura 35: Gráfico da distribuição exponencial.....	50
Figura 36: Resultado do teste KS para a distribuição exponencial.....	50
Figura 37: Resultado do teste Qui Quadrado para a distribuição exponencial.	50
Figura 38: Gráfico da distribuição Gama.....	51
Figura 39: Resultado do teste KS para a distribuição Gama.	51
Figura 40: Resultado do teste Qui Quadrado para a distribuição Gama.....	51
Figura 41: Mapa de setorização da cava. A estrela vermelha representa o setor 1B...52	
Figura 42: Famílias do setor B agrupadas no <i>Dips</i>	53
Figura 43: Análise cinemática do <i>Dips</i> com a interseção de todos planos mapeados. Em A, tem-se a análise para o talude global e em B o talude de bancada.	59
Figura 44: Análise cinemática do <i>Dips</i> com a interseção de planos médios das famílias 4b e 6b.....	60
Figura 45: Interseção das famílias 4b e 6b e relação com os taludes de bancada e global.....	61
Figura 46: Em A tem-se a análise cinemática para ruptura planar nos taludes de bancada. Já em B, tem-se a análise cinemática para ruptura planar no talude global. 62	
Figura 47: Em A tem-se a análise cinemática para tombamento flexural nos taludes de bancada. Já em B, tem-se a análise cinemática para tombamento flexural no talude global.....	63
Figura 48: Em A tem-se a análise cinemática para tombamento de blocos no talude global. Já em B, tem-se a análise cinemática para tombamento de blocos nos taludes de bancada.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Condições das Descontinuidades - Espaçamento.	7
Tabela 2: Condições das descontinuidades - Persistência	7
Tabela 3: Condição das descontinuidades - Rugosidade	8
Tabela 4: Classificação da resistência das paredes.	9
Tabela 5: Classes do estado de alteração das Rochas.	10
Tabela 6: Abertura das descontinuidades	11
Tabela 7: Condição das descontinuidades - Preenchimento.	11
Tabela 8: Resistência da rocha intacta.	12
Tabela 9: Rock Quality Designation.	13
Tabela 10: Espaçamento das fraturas.	13
Tabela 11: Condições das fraturas.	13
Tabela 12: Água subterrânea.	14
Tabela 13: Relação da direção e mergulho das descontinuidades com a abertura de túneis.	14
Tabela 14: Orientação das descontinuidades.	14
Tabela 15: Classes dos maciços rochosos.	15
Tabela 16: Domínio e unidades de mapeamento da mina estudada	25
Tabela 17: Resumo das características predominantes das descontinuidades.	43
Tabela 18: Resultados da análise estatística dos dados de espaçamento.	44
Tabela 19: Planos médios (<i>dip e dip direction</i>) das famílias de descontinuidades do setor 1B.	53
Tabela 20: Resumo das características das descontinuidades do setor 1B.	55
Tabela 21: Resultados para os parâmetros s e a de Hoek-Brown.	56
Tabela 22: Resultados para os parâmetros de Barton-Bandis.	57
Tabela 23: Dados dos taludes de bancada, global e ângulo de atrito.	58
Tabela 24: Resultado da análise cinemática para a ruptura em cunha da combinação das famílias com possibilidade ruptura.	60
Tabela 25: Combinação entre as famílias do setor 1B e probabilidade de ruptura por tombamento de blocos.	65

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

GSI - Geological Strength Index

IAF - anfibolito compacto

IGD/A - granodiorito friável

IGD - granodiorito

ISRM - International Society for Rock Mechanics

JCS - resistência à compressão uniaxial das paredes das descontinuidades

JRC- coeficiente de rugosidade da junta

MSC- Minério Sílico Carbonatado

RMR - Rock Mass Rating

RQD - Rock Quality Designation

XQB - Quartzo biotita xisto

τ - resistência ao cisalhamento

σ_n - tensão normal

φ - ângulo de atrito básico da rocha intacta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO	1
1.2	NATUREZA DO PROBLEMA	1
1.3	OBJETIVOS E METAS.....	3
1.3.1	Objetivo geral.....	3
1.3.2	Objetivos específicos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS	4
2.1.1	Descontinuidades	4
2.2	CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES	5
2.2.1	Efeito Escala	5
2.2.2	Orientação espacial	5
2.2.3	Espaçamento	6
2.2.4	Persistência	7
2.2.5	Rugosidade.....	7
2.2.6	Resistência da parede.....	8
2.2.7	Abertura	10
2.2.8	Preenchimento.....	11
2.3	CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS	11
2.3.1	Sistema RMR.....	12
2.4	CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA	15
2.4.1	Critério de Hoek-Brown	15
2.4.2	GSI.....	16
2.4.3	Critério de Barton-Bandis	18
2.5	MECANISMOS DE RUPTURA	20
2.5.1	Ruptura planar.....	20
2.5.2	Ruptura em cunha	20
2.5.3	Ruptura por tombamento de blocos e flexural	21
2.6	GEOLOGIA DA MINA ESTUDADA	22
2.6.1	Geologia Regional	22
2.6.2	Geologia local	24

2.7	DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS E TESTES DE HIPÓTESES	25
2.7.1	Distribuições estatísticas	25
2.7.2	Testes KS, normalidade de Shapiro-Wilk e χ^2	28
3	METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO	30
3.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO, COMPILAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS	30
3.2	DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES	30
3.3	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DAS DESCONTINUIDADES.....	31
3.4	ANÁLISE E DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS	32
3.5	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO CRITÉRIO DE HOEK-BROWN E BARTON-BANDIS	32
3.6	ANÁLISE CINEMÁTICA DO SETOR 1B	32
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	34
4.1	DEFINIÇÃO DAS FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES E CARACTERÍSTICAS	34
4.1.1	Família 1	34
4.1.2	Família 2	35
4.1.3	Família 3	36
4.1.4	Família 4	37
4.1.5	Família 5	39
4.1.6	Família 6	40
4.1.7	Família 7	41
4.1.8	Família 8	42
4.2	ANÁLISE E DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS	44
4.2.1	Distribuições dos dados e testes estatísticos	46
4.3	O SETOR 1B	52
4.3.1	Características gerais dos maciços e das descontinuidades	52
4.3.2	Definição dos parâmetros dos critérios de resistência do setor 1B.....	56
4.3.3	Análise cinemática do setor 1B.....	57
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
5.1	CONCLUSÕES	66
5.2	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
	ANEXOS	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Conhecer as características geológico-geotécnicas dos maciços rochosos é de suma importância em todos os tipos de escavações e empreendimentos de natureza geotécnica. Em cavas de mina essa caracterização tem como principal objetivo conhecer o corpo mineral e o estéril, avaliar a estabilidade dos taludes e traçar um plano de fogo com segurança, para que assim a extração de bem mineral possa ser feita de forma segura e da maneira mais sustentável e rentável possível.

Entende-se por maciço rochoso o conjunto de rocha intacta e descontinuidades. São considerados como materiais heterogêneos, porosos, quase sempre descontínuos, compostos por um conjunto de grãos, formando assim uma estrutura sólida (AZEVEDO, 2005). Por serem descontínuos, é comum a ocorrência de casos de instabilidade dos blocos rochosos e até mesmo a ruptura completa do maciço. Esse tipo de evento pode trazer enormes prejuízos para a mineração, como por exemplo, a danificação de equipamentos posicionados na rota de ruptura, paralisação da lavra e até mesmo perdas de vidas humanas.

Nesse sentido, esse trabalho analisou o comportamento geomecânico dos maciços rochosos e das descontinuidades de uma cava de mina, utilizando dados de mapeamento geotécnico das descontinuidades presentes no local, a fim de analisar as características das mesmas, possíveis pontos de instabilidade geotécnica e até mesmo rupturas de taludes. Além disso, foi realizado a análise estatística dos dados do espaçamento e análises cinemáticas do setor 1B, onde em 2013 ocorreu uma ruptura.

1.2 Natureza do problema

Em 2013 ocorreu no setor norte da mina em estudo uma complexa ruptura que culminou com a paralisação das atividades de mineração por aproximadamente um ano. O mecanismo de ruptura nesse caso foi muito complexo, formado por uma camada de rocha intemperizada que exerceu uma forte pressão sobre a parte inferior, que era formada por rocha não intemperizada e apresentava duas famílias de descontinuidades, que se cruzaram e formaram uma cunha (EMPRESA, 2014).

Nessa perspectiva é importante se conhecer cada vez mais as características e propriedades geomecânicas dos maciços e suas descontinuidades para evitar que algum evento geotécnico venha a paralisar as atividades mineiras novamente. Sendo assim, é de grande importância conhecer as características das descontinuidades tais como persistência e espaçamento e estimar a qualidade geomecânica das rochas presentes na cava.

1.3 OBJETIVOS E METAS

1.3.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral desse estudo consistiu em realizar a análise geotécnica dos dados de descontinuidades coletados no mapeamento de uma cava a céu aberto e posteriormente definir parâmetros de resistência, como os de Hoek-Brown e Barton-Brandis. Além disso, realizou o tratamento estatístico do espaçamento do banco de dados fornecido, com objetivo de compreender o comportamento e tendência de distribuição dos mesmos.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Encontrar e denominar as principais famílias de descontinuidades de todos os dados disponíveis, usando o *Heurística* (KLEN, 2015);
- Definir alguns parâmetros do critério de Hoek-Brown e Barton-Bandis;
- Realizar a distribuição estatística dos dados de espaçamento das descontinuidades e testar as mesmas usando o R (MELLO E PETERNELLI, 2013);
- Analisar o comportamento das descontinuidades do setor 1B da mina, local onde ocorreu a ruptura;
- Realizar a análise cinemática do setor supracitado no software *Dips* (ROCSCIENCE, 2013)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

De maneira geral, um maciço rochoso pode ser definido como um material heterogêneo, poroso, quase sempre descontínuo, composto por uma série de grãos, formando um arcabouço sólido (MOREIRA, 2016). Já para a ABNT-NBR 6502 (1995) maciço rochoso é o conjunto de rocha intacta e descontinuidades. Por vezes essas descontinuidades podem estar preenchidas por água. Para a geotecnia, um maciço rochoso por ser definido como um meio em que as propriedades dominantes estão relacionadas à presença de descontinuidades (MOREIRA, 2016).

2.1.1 *Descontinuidades*

Entende-se por descontinuidades qualquer feição de natureza geológica que interrompa a continuidade física do maciço (OLIVEIRA E BRITO, 1998). A seguir definem-se alguns tipos de descontinuidades mais comuns.

2.1.1.1 Foliações

As foliações podem ser definidas como sendo uma estrutura geológica plana ou curvo-plana determinada pela orientação paralela de minerais em rochas metamórficas e ígneas. Podem ser foliações primárias ou secundárias. A primeira se forma durante a deposição de sedimentos e a cristalização de rochas ígneas. Já a segunda se forma por esforços e deformações, sendo assim de origem tectônica. Exemplos de foliações são as clivagens, foliações miloníticas e xistosidade (FOSSEN, 2012).

2.1.1.2 Faturas

São estruturas geológicas formadas por esforços tectônicos ou térmicos. São descontinuidades mecânicas delgadas associadas à perda de rigidez e resistência da rocha e a deslocamentos. Nesse caso, os deslocamentos são pequenos, da ordem de mm a dm, sendo essa característica o que difere uma falha (rejeito maior) de uma fratura (FOSSEN, 2012).

2.1.1.3 Falhas

É uma superfície de grande dimensão e possui um deslocamento visível causado por um cisalhamento. São estruturas bem mais complexas que as fraturas e juntas e podem acomodar grande quantidade de deformação na crosta terrestre (FOSSÉN, 2012). Define-se como zona de falha quando a faixa de rochas fragmentadas pela formação de uma falha possui extensões métricas. As falhas ou zonas podem ser definidas por um ou mais planos e um material cominuído, resultante do movimento de cisalhamento. A cominuição da rochas constitui a chamada farinha de falha, de textura fina e de coloração escura. Denomina-se rejeito de falha o deslocamento relativo entre os blocos adjacentes, medido segundo a orientação das estrias de atrito (CELLA E MAGALHÃES, 1998).

2.2 CARACTERÍSTICAS DAS DESCONTINUIDADES

2.2.1 *Efeito Escala*

O efeito escala deve ser considerado no estudo da relação entre as descontinuidades e o empreendimento em que estão inseridas. Pode-se expressar como exemplo a relação existente entre o espaçamento médio das descontinuidades e a altura de um talude de bancada de uma mina (CELLA E MAGALHÃES, 1998). Se o espaçamento for muito grande não terá tanta influência em uma possível ruptura do talude. Se considerar um talude global a influência das descontinuidades será mais sutil. O maciço tende a se comportar como um contínuo equivalente e o modo de ruptura do mesmo pode ocorrer pela combinação de vários tipos de descontinuidades.

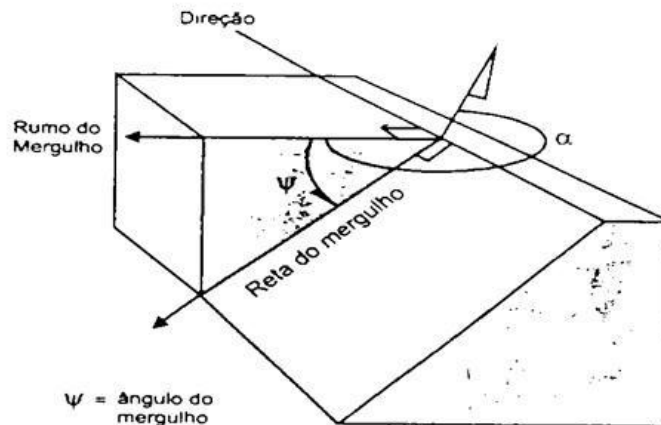
2.2.2 *Orientação espacial*

As descontinuidades se distribuem espacialmente segundo uma orientação específica, formando um conjunto de descontinuidades com aproximadamente a mesma atitude, que se denomina de família de descontinuidades. Essa orientação ocorre devido à associação de eventos de natureza tectônica com o campo de tensões atuantes nos maciços rochosos (CELLA E MAGALHÃES, 2004).

Uma descontinuidade é definida espacialmente por sua direção e pelo ângulo de mergulho. A direção é definida pelo ângulo que a interseção do plano da descontinuidade com o plano horizontal faz com a direção norte. Já o mergulho é a

inclinação do plano da descontinuidade com o plano horizontal, ou seja, é a inclinação da reta de máximo declive (Figura 1). A orientação espacial de uma descontinuidade é medida com auxílio da bússola do geólogo (FOSSEN, 2012; CELLA E MAGALHÃES, 1998).

Figura 1: Exemplo de orientação de uma descontinuidade.



Fonte: ISRM, 1981.

2.2.3 Espaçamento

Essa característica corresponde à distância entre duas descontinuidades adjacentes de uma mesma família (OJIMA E JÚNIOR, 1998). A partir do espaçamento é possível obter outros parâmetros como a frequência das descontinuidades, que nada mais é que a quantidade de descontinuidades por espaço de medida. Esta característica é uma das mais relevantes para descrever o comportamento geomecânico e hidráulico de um maciço rochoso (CELLA E MAGALHÃES, 1998).

Quanto maior for o espaçamento entre as descontinuidades, menos significativas são as deformações que o maciço rochoso experimentou. Em outras palavras, se o espaçamento entre as descontinuidades for menor, ou seja, as descontinuidades estão mais próximas, mais descontínua será a rocha. A Tabela 1 mostra a relação definida por Bieniawski (1989) para definir os critérios de classificação quanto ao espaçamento das descontinuidades.

Tabela 1: Condições das Descontinuidades - Espaçamento.

CATEGORIA	ESPAÇAMENTO MÉDIO DAS FRATURAS (CM)	DESCRIÇÃO
L1	>200	Muito afastadas
L2	200-60	Afastadas
L3	60-20	Medianamente afastadas
L4	20-6	Próximas
L5	<6	Muito próximas

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

2.2.4 *Persistência*

A persistência é definida como a extensão/continuidade do traço da descontinuidade e determina o grau de compartimentação dos maciços. Essa característica também permite dizer sobre a ordem dos acontecimentos de eventos tectônicos: descontinuidades mais recentes tendem a se originar das mais antigas ou se interromper nelas (CELLA E MAGALHÃES, 1998). Uma descontinuidade com extensão de até 10 metros é considerada pouco persistente e acima de 10 m é definida como de alta persistência (SILVA, 2018) (Tabela 2).

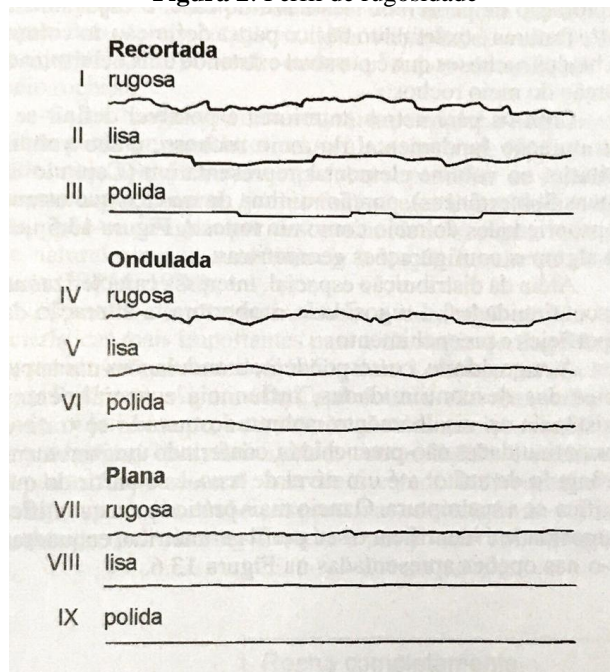
Tabela 2: Condições das descontinuidades - Persistência

PERSISTÊNCIA	
<1m	6
1-3m	4
3-10m	2
10-20m	1
>20m	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

2.2.5 *Rugosidade*

Define-se rugosidade como sendo ondulações e imperfeições presentes na superfície das descontinuidades, que influenciam principalmente a resistência ao cisalhamento. Uma forma de quantificar a rugosidade é usar o perfil de rugosidade proposto por Barton (1974) (Figura 2).

Figura 2: Perfil de rugosidade

Fonte: (BARTON *et al*, 1974).

A Tabela 3 mostra a relação das descontinuidades quanto à característica rugosidade, definida por Bieniawski (1989).

Tabela 3: Condição das descontinuidades - Rugosidade

RUGOSIDADE	
Muito rugosa	6
Rugosa	5
Levemente rugosa	3
Lisa	1
Espelhada	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989

2.2.6 Resistência da parede

Refere-se à resistência a compressão das paredes vizinhas a uma descontinuidade (SILVA, 2018). Em campo pode ser determinada com instrumentos simples como o martelo do geólogo e por uma lâmina de canivete. De acordo com o risco produzido por esses instrumentos a resistência da parede poderá ser classificada como Extremamente Fraca (R0) a Extremamente Forte (R6) (ISRM, 1981). A Tabela 4 mostra um compilado dessas características.

Tabela 4: Classificação da resistência das paredes.

DENOMINAÇÕES	DEFINIÇÃO PARA USO EM CAMPO
Extremamente fraca (R0)	Riscado pela unha.
Muito fraca (R1)	Esfarela sob pancadas firmes do martelo de geólogo, pode ser descascado pela lâmina do canivete.
Fraca (R2)	Pode ser descascado com dificuldade pela lâmina de um canivete, buracos rasos podem ser criados com uma pancada firme da ponta do martelo do geólogo.
Medianamente forte (R3)	Não pode ser riscado com um canivete, pode ser quebrado por uma única pancada firme do martelo de geólogo.
Forte (R4)	Requer mais de uma pancada de martelo de geólogo para quebrar.
Muito forte (R5)	Requer muitas pancadas do martelo de geólogo para quebrar.
Extremamente forte (R6)	Pode apenas ser lascado com um martelo de geólogo.

Fonte: ISRM, 1981.

2.2.7 Estado de alteração

Alteração de uma rocha é o processo de desagregação e decomposição causado por agentes físicos e químicos naturais que transformam a mesma. A depender do grau de alteração as rochas podem ser classificadas como sãs até completamente intemperizadas, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Classes do estado de alteração das Rochas.

TERMO	DESCRIÇÃO	CLASSE
SÃ	Nenhum sinal visível de alteração da matriz; possível leve descoloração ao longo das descontinuidades principais.	W1
LEVEMENTE INTEMPERIZADO	Descoloração indica intemperismo da matriz da rocha e de superfícies de descontinuidade. Toda a matriz da rocha pode estar descolorida pelo intemperismo e pode estar algo mais branda externamente do que na condição sã.	W2
MEDIANAMENTE INTEMPERIZADO	Menos da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	W3
ALTAMENTE INTEMPERIZADO	Mais da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. Rocha sã ou descolorida está presente, formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	W4
COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO	Toda a matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada à condição de solo. A estrutura original do maciço está, em grande parte, preservada.	W5
SOLO RESIDUAL	Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e da matriz da rocha está destruída. Há uma grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	W6

Fonte: (ISRM, 2007).

2.2.8 Abertura

Consiste na distância perpendicular entre as paredes de uma mesma descontinuidade (SILVA, 2018). É importante no estudo da percolação de água e caracteriza-se como vazia ou preenchida. A abertura atual pode não corresponder à abertura original, que

pode ter sofrido modificações devido a processo da dinâmica externa e interna da Terra, tais como processos de erosão e soerguimento (CELLA E MAGALHÃES, 1998). A Tabela 6 mostra pontuações atribuídas para a abertura que permitem a classificação das mesmas.

Tabela 6: Abertura das descontinuidades

ABERTURA	Fechada	6
	<0,1mm	5
	0,1 – 1,0mm	4
	1-5 mm	1
	>5mm	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

2.2.9 Preenchimento

As aberturas das descontinuidades podem estar vazias, ocupadas por água ou por outro material. O preenchimento irá influenciar notavelmente nos parâmetros de resistência e condutividade hidráulica do maciço. Para descrever o preenchimento deve-se relatar sobre a sua espessura e natureza dos seus constituintes (OJIMA E JÚNIOR, 1998). A Tabela 7 mostra as descrições correspondentes às condições do preenchimento.

Tabela 7: Condição das descontinuidades - Preenchimento.

PREENCHIMENTO	
Nenhum	6
Duro; < 5mm	4
Duro; >5mm	2
Macio; <5mm	2
Macio; >5mm	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

2.3 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

As classificações geomecânicas foram inicialmente concebidas para a classificação de túneis, mais tarde estendidas para outros empreendimentos como minas e taludes urbanos. Muitos sistemas de classificação foram desenvolvidos, podendo citar o RSR, o RMR, o Q e o RQD, que hoje é incorporado em outros sistemas. Os sistemas hoje mais utilizados são o RMR e o Q. O segundo não será descrito nesse trabalho, pois o mesmo não é contemplado nessa pesquisa.

2.3.1 Sistema RMR

O sistema RMR foi proposto por Bieniawski (1979) e é composto pela análise de 6 parâmetros relativos aos maciços rochosos, sendo esses: resistência à compressão simples, o RQD (Rock Quality Designation), o espaçamento das descontinuidades, a condição das descontinuidades (persistência, alteração, rugosidade e abertura), condições de água subterrânea e orientação das descontinuidades em relação ao corte ou escavação (CHRISTOFOLLETTI, 2014). Esse sistema foi inicialmente proposto para obras civis em túneis e o seu tempo de sustentação sem suporte, e depois foi utilizado também para estimar a coesão e o ângulo de atrito de maciços rochosos. Porém atualmente é usado em obras de qualquer natureza, para a classificação de maciços rochosos e estimação de sua resistência (OLIVEIRA E BRITO, 1998).

Para obter os parâmetros deve-se levar em consideração dados de levantamentos geotécnicos de campo. Aos 6 parâmetros definidos por Bieniawski (1979) são atribuídos uma nota e o somatório dessas notas (valor adimensional) será a classificação geomecânica. Tem-se a seguir as tabelas 8 a 14, que mostram as notas para cada um dos parâmetros.

Tabela 8: Resistência da rocha intacta.

RESISTÊNCIA DA ROCHA INTACTA		
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	Índice de carga pontual (MPa)	Peso associado (P1)
>250	>10	15
100 a 250	4 a 10	12
50 a 100	2 a 4	7
25 a 50	1 a 2	4
5 a 25	Para valores menores de	2
1 a 5	resistência à carga	1
<1	puntiforme: utilizar o teste de compressão uniaxial	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

Tabela 9: Rock Quality Designation.

RQD (%)	QUALIDADE DA ROCHA
<25	muito ruim
25 A 50	ruim
50 A 75	razoável
75 A 90	bom
90 A 100	excelente

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

Tabela 10: Espaçamento das fraturas.

ESPAÇAMENTO DAS FRATURAS(M)	PESO RELATIVO
>2m	20
0,6-2m	25
200- 600mm	10
60-200mm	8
<60mm	5

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

Tabela 11: Condições das fraturas.

CONDIÇÕES DAS FRATURAS	PESO RELATIVO
Superfícies muito rugosas, não contínuas, fechadas, paredes duras	30
Superfícies pouco rugosas, abertura <1mm, paredes duras	25
Superfícies pouco rugosas, abertura <1mm, paredes moles	20
Superfícies estriadas ou preenchimento < 5mm ou abertura 1-5mm, contínuas	10
Preenchimento mole >5mm ou abertura > 5mm, contínuas	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

Tabela 12: Água subterrânea.

ÁGUA SUBTERRÂNEA	PESO RELATIVO
Completamente seco	10
Umidade	7
Água sob pressão moderada	4
Problemas graves de água	0

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

Tabela 13: Relação da direção e mergulho das descontinuidades com a abertura de túneis.

Direção (<i>Strike</i>) perpendicular em relação ao eixo do túnel			
Na direção de mergulho		Contra direção de mergulho	
45° a 90°	20° a 45°	45° a 90°	20° a 45°
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável
Direção (<i>strike</i>) paralela em relação ao eixo do túnel		Independente da direção (<i>strike</i>)	
20° a 45°	45° a 90°	0° a 20°	
Razoável	Muito desfavorável	Razoável	

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

Tabela 14: Orientação das descontinuidades.

DIREÇÃO E MERGULHO	PESO RELATIVO		
	TÚNEIS	FUNDAÇÕES	TALUDES
Muito Favorável	0	0	0
Favorável	-2	-2	-2
Aceitável	-5	-7	-25
Desfavorável	-10	-15	-50
Muito desfavorável	-12	-50	-60

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

O RMR será a soma dos pesos atribuídos a todos os parâmetros supracitados e assim será possível definir uma classe para o maciço rochoso (Tabela 15). De acordo com o resultado final é possível estimar valores de referência para o tempo de auto sustentação do maciço, assim como as características da seção de escavação e métodos de suporte, caso seja necessário (OJIMA E JÚNIOR, 1998). O uso do RMR

nessa pesquisa foi no cálculo GSI, que posteriormente foi usado para determinar os parâmetros de Hoek-Brown.

Tabela 15: Classes dos maciços rochosos.

CLASSES DOS MACIÇOS ROCHOSOS		
CLASSE	DESCRIÇÃO	SOMA DOS PESOS
I	Muito bom	100 - 81
II	Bom	81- 61
III	Regular	60-41
IV	Pobre	40-21
V	Muito pobre	20

Fonte: BIENIAWSKI, 1989.

2.4 CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA

2.4.1 Critério de Hoek-Brown

Baseado em dados experimentais e em conceitos da mecânica das rochas fraturadas Hoek e Brown (1980), estabeleceram um critério que é definido pela Equação 1.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (1)$$

em que σ_1 e σ_3 são, respectivamente, as tensões principais efetivas máxima e mínima na ruptura, m_b é um valor reduzido da constante da rocha intacta, σ_{ci} é a resistência à compressão da rocha intacta e s e a são constantes para o maciço rochoso. Se a rocha for intacta tem-se que $m_b=m_i$. Para determinar os parâmetros m_b , s e a , deve-se utilizar as equações 2, 3 e 4 que tem como base o Sistema GSI (*Geological Strength Index*) (SANTOS, 2015).

$$m_b = m_i \times e^{\frac{GSI-100}{28-14D}} \quad (2)$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}} \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (4)$$

O parâmetro D é um fator dependente da perturbação que o maciço foi submetido por desmonte a fogo. Varia de 0 a 1, na qual 0 indica que o maciço não sofreu perturbação e 1 indica que o maciço foi muito perturbado. Já para se obter m_i deve-se realizar ensaios triaxiais na rocha (SANTOS, 2015).

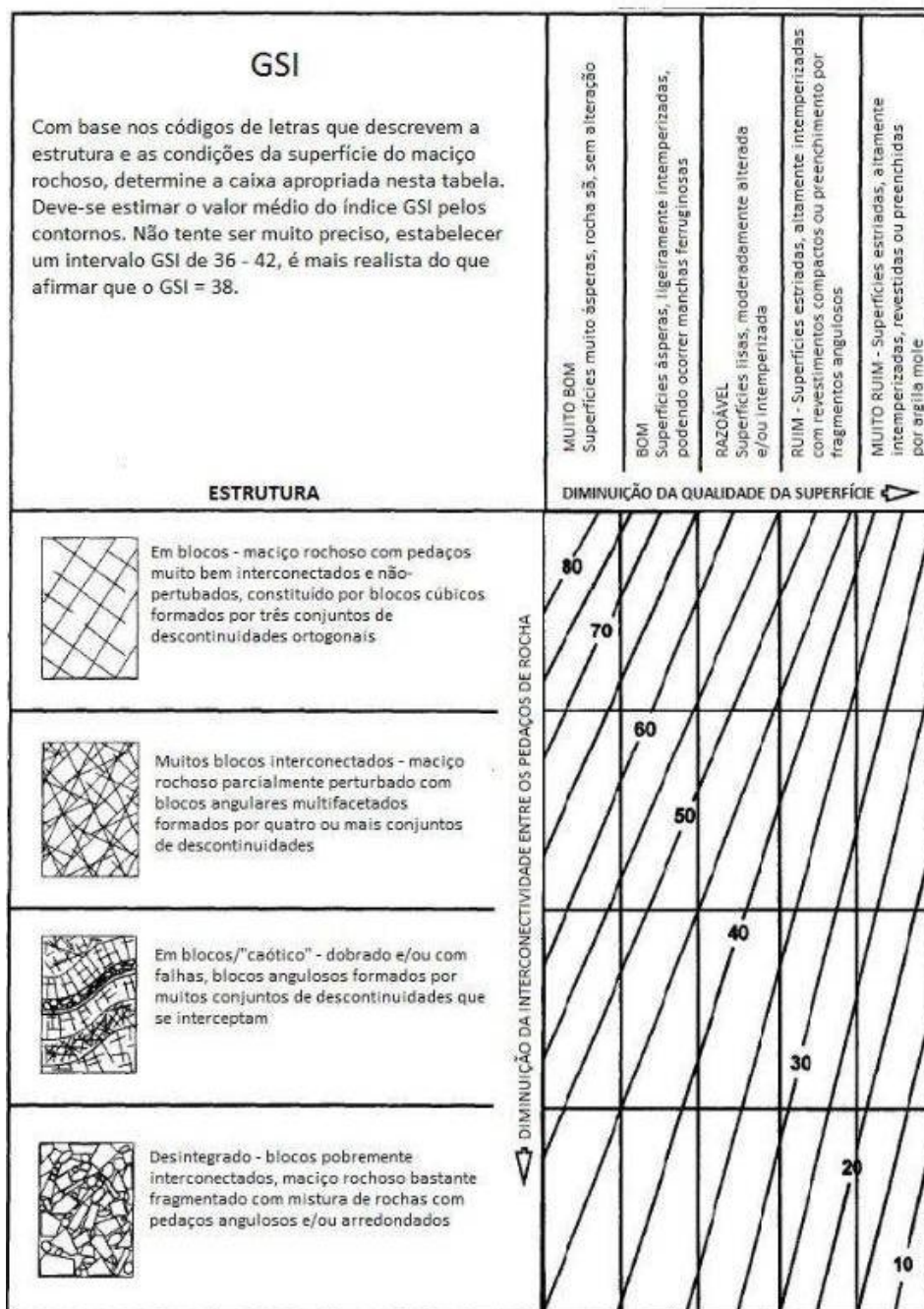
2.4.2 GSI

Para utilizar as equações 2, 3 e 4 Hoek (1994) introduziu a classificação GSI como uma ferramenta para coleta de informações de campo com o objetivo de estimar as constantes m_b , a e s do critério de Hoek e Brown. O GSI leva em consideração os dois principais fatores que influenciam nas propriedades mecânicas dos maciços rochosos: a estrutura da rocha e as condições das descontinuidades (HOEK E BROWN, 2018).

Esse sistema também foi criado para solucionar as deficiências do sistema RMR, que não é adequado as rochas muito fraturadas ou alteradas. O sistema RMR é fortemente dependente da classificação RQD, que em rochas muito fraturadas ou alteradas é praticamente zero ou sem sentido. Além disso, o espaçamento é outro atributo das descontinuidades que muito influencia na classificação RMR e é correlacionável ao RQD. Sendo assim o GSI vem como uma classificação alternativa que foca mais nas características geológicas do maciço. Vale ressaltar que o sistema GSI não substitui os outros sistemas de classificação de maciços, mas sim é uma ferramenta que estima as propriedades de rochas heterogêneas e fraturadas (MARINOS *et al.*, 2005).

O GSI é baseado em uma análise de litologia, de estrutura e das condições das descontinuidades feita a partir de inspeção visual em afloramentos rochosos, superfícies de escavações, cortes de estrada e em faces de túneis (MARINOS *et al.*, 2005). Para se obter o GSI utiliza-se o ábaco da Figura 3, proposto por Hoek e Brown (1997).

Figura 3: Classificação GSI.



Fonte: (HOEK E BROWN 1997).

2.4.3 Critério de Barton-Bandis

Em 1973 Barton propôs um critério de resistência ao cisalhamento de rochas, apresentado de uma maneira empírica, usando um critério não linear e baseado no comportamento das descontinuidades sem preenchimento e não alteradas (TAPAHUASCO, 2017). Em 1982, juntamente com Bandis, esse autor cria o denominado critério de Barton-Bandis que é apresentado pela Equação 6. Esses autores indicaram que a resistência ao cisalhamento de uma superfície rugosa está ligada a rugosidade, a resistência da rocha intacta e a tensão normal (SANTOS, 2015).

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \varphi] \quad (6)$$

onde;

τ : resistência ao cisalhamento;

σ_n : tensão normal;

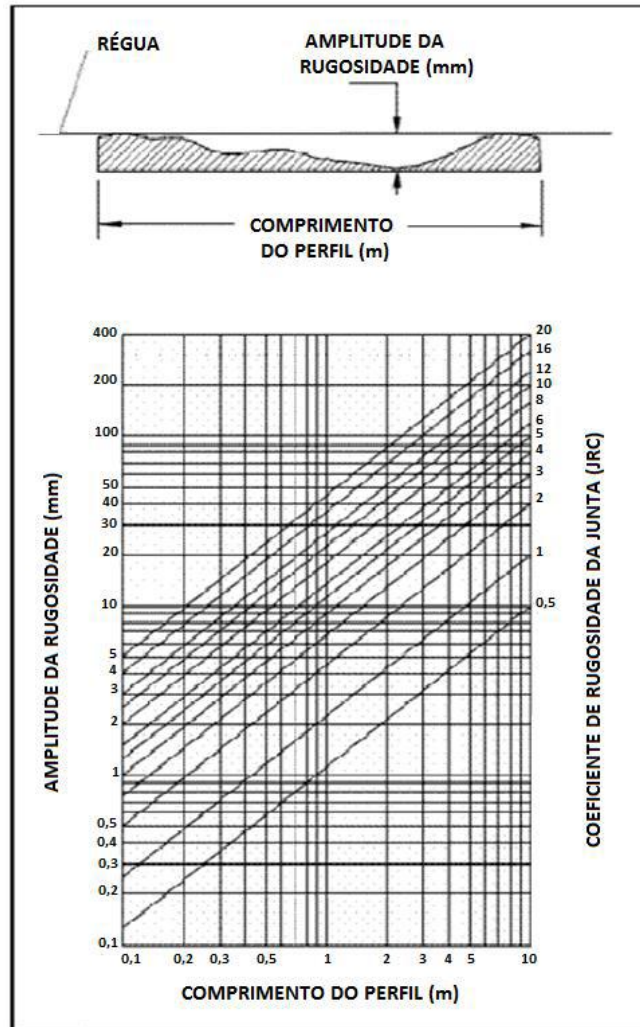
φ : ângulo de atrito básico da rocha intacta;

JRC: coeficiente de rugosidade da junta;

JCS: resistência à compressão uniaxial das paredes das descontinuidades.

O parâmetro JRC é determinado a partir do ábaco de Barton, que por sua vez está relacionado à amplitude da rugosidade e o comprimento do perfil (Figura 4).

Figura 4: Estimativa do JRC.



Fonte: BARTON, 1982.

Para Barton (1973), existem três componentes de resistência ao cisalhamento que entram no critério proposto por ele. Esses componentes seriam um componente de atrito residual (ϕ_r), um geométrico controlado pela rugosidade da superfície (JRC) e um componente de ruptura da aspereza controlada pela razão (JCS / σ_n). Já para superfícies alteradas Barton e Choubey (1977), alteraram a Equação 6, trocando o ângulo de atrito básico (ϕ) pelo ângulo de atrito residual (ϕ_r). O ângulo de atrito residual pode ser obtido pela Equação 7 (TAPAHUASCO, 2017) ou estimado pela razão do J_r e do J_a . (Equação 8).

$$\phi_r = (\phi - 20^\circ) + \frac{r}{R} \quad (7)$$

$$\tan^{-1}(\phi) = \frac{J_r}{J_a} \quad (8)$$

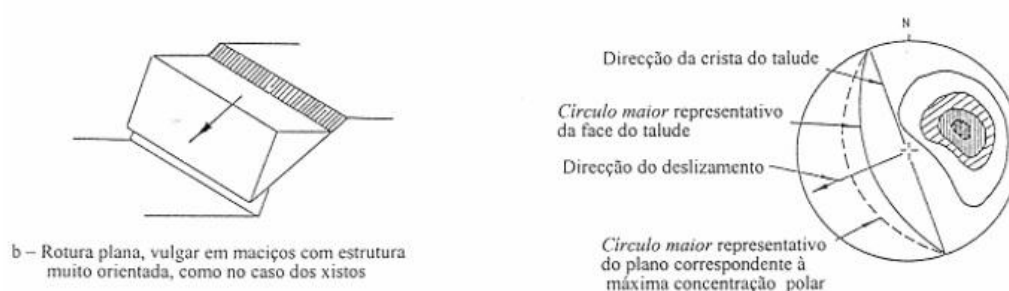
Onde r é o valor do rebote do esclerômetro sobre a superfície da parede da junta alterada e R é o valor do rebote do esclerômetro ou martelo de Schmidt, sobre uma superfície da parede da junta sã.

2.5 MECANISMOS DE RUPTURA

2.5.1 Ruptura planar

É um tipo de ruptura bidimensional e ocorre quando uma estrutura, seja foliação, acamamento ou contato litológico, possui a direção paralela ou quase paralela à face do talude, com o ângulo de mergulho menor que o da face. Para que a ruptura planar ocorra, o ângulo da superfície de deslizamento deve vencer o atrito do plano, ou seja, o ângulo de mergulho da superfície deve ser maior que o ângulo de atrito (Figura 5) (WYLLIE E MAH, 2004).

Figura 5: Esquema de ruptura planar e estereograma representando a condição estrutural para esse evento.



Fonte: Disponível em https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf. 2019.

Na parte superior do talude se forma um plano de interseção e uma fenda conhecida como fenda de tração. Em muitos casos o início de uma ruptura desse tipo é reconhecida através da dessa fenda.

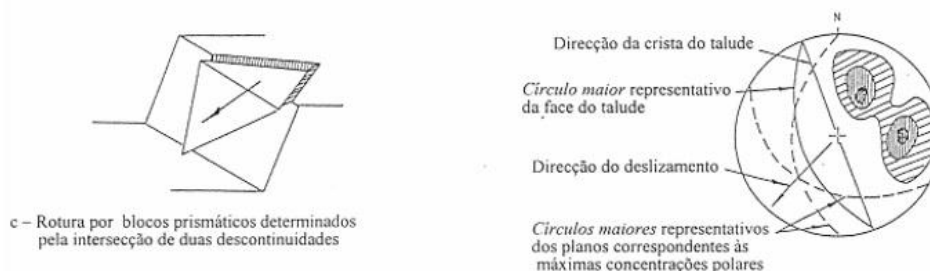
2.5.2 Ruptura em cunha

A ruptura em cunha ocorre quando dois planos se interceptam e a linha formada por essa interseção emerge na face do talude com ângulo de mergulho menor que o da

face (Figura 6). Outra condição importante é que o ângulo de mergulho da linha de interseção seja maior que o ângulo de atrito da rocha (WYLLIE E MAH, 2004).

O estereograma define a linha de interseção dos dois planos e a direção de deslizamento da cunha formada (Figura 6) (WYLLIE E MAH, 2004).

Figura 6: Formação de uma cunha de rocha pela interseção de dois planos e o estereograma representando a condição estrutural para uma ruptura em cunha.



Fonte: Disponível em https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf. 2019.

2.5.3 Ruptura por tombamento de blocos e flexural

Para que ocorra a ruptura por tombamento é necessário que a família de descontinuidades possua um alto ângulo de mergulho, não divergindo mais que 20° graus em relação a reta de maior declive da face do talude. Além disso, deve ter a direção oposta ao plano de face do talude (WYLLIE E MAH, 2004) (Figura 7).

Se as camadas da face tiverem um ângulo de atrito ϕ então o escorregamento só ocorrerá se a direção das tensões de compressão aplicadas fizer com a normal às descontinuidades um ângulo superior a ϕ (WYLLIE E MAH, 2004). Ademais a condição a seguir de ser satisfeita (Equação 9):

$$(90^\circ - \psi_f) + \phi < \psi_p \quad (9)$$

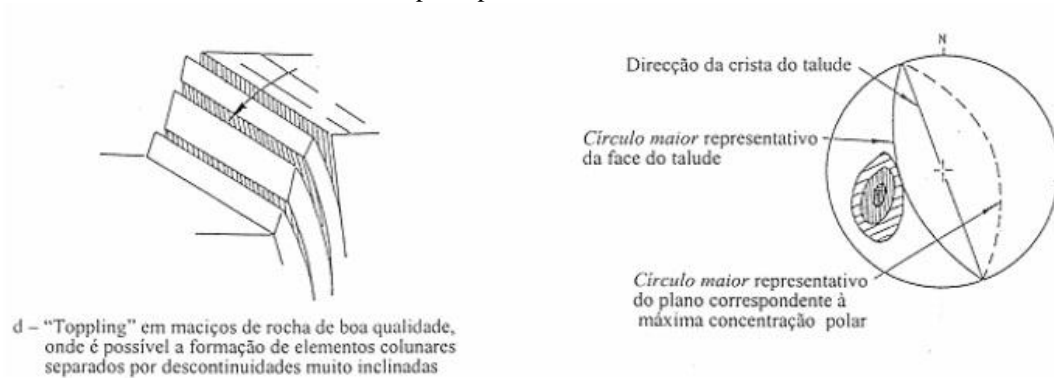
Onde;

ψ_f : ângulo de mergulho da face;

ψ_p : ângulo de mergulho da descontinuidade;

ϕ : ângulo de atrito.

Figura 7: Formação de blocos de rocha e estereograma representando a condição estrutural para uma ruptura por tombamento.



Fonte: Disponível em https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf. 2019.

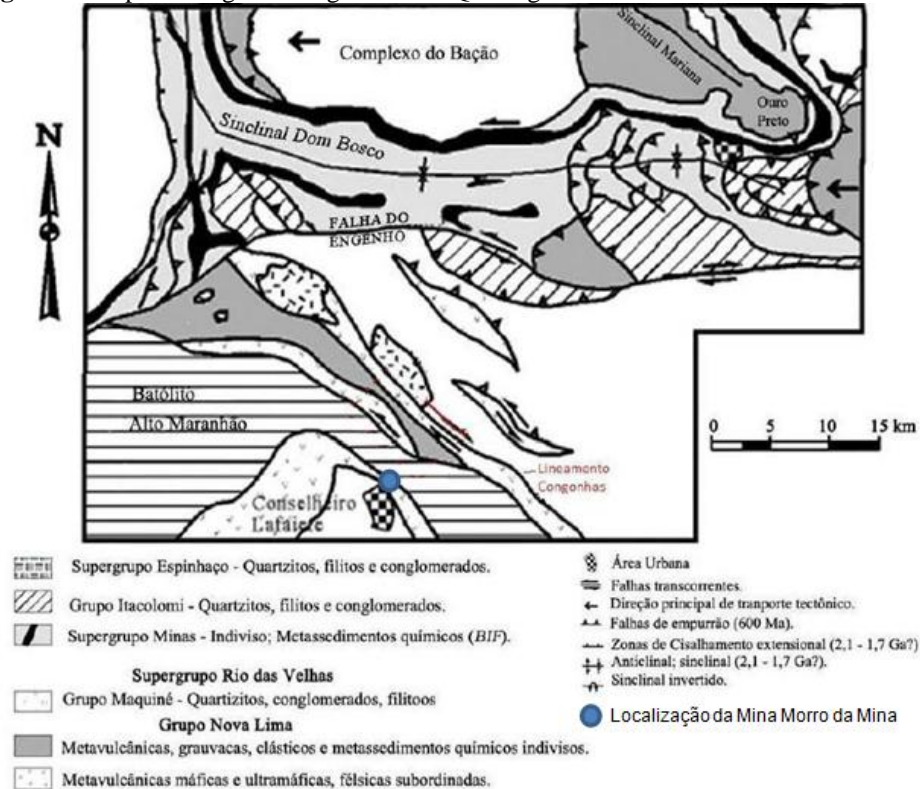
O tombamento flexural normalmente ocorre em rochas foliadas ou estratificadas e o tombamento de blocos é possível quando as colunas de rocha são divididas por juntas ortogonais amplamente espaçadas, individualizando os blocos

2.6 GEOLOGIA DA MINA ESTUDADA

2.6.1 *Geologia Regional*

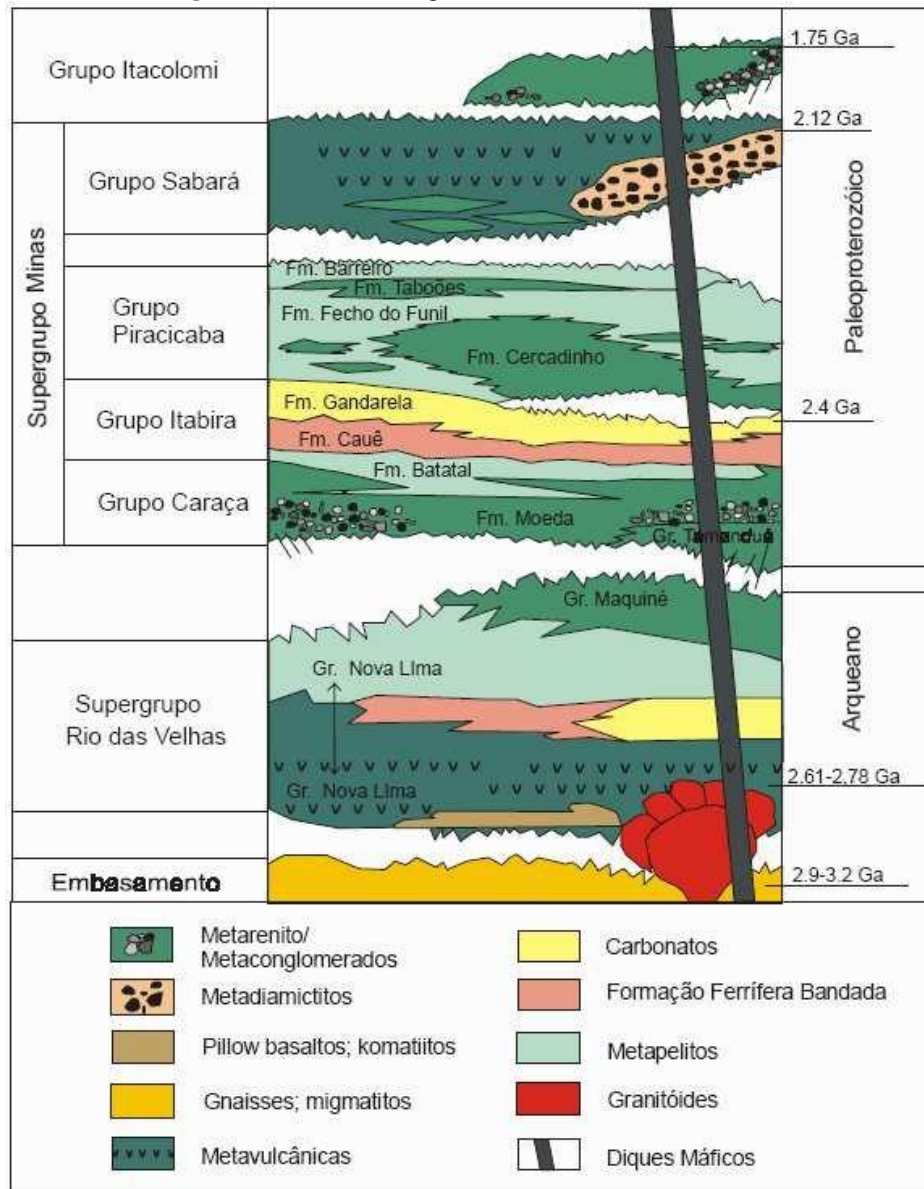
A mina encontra-se localizada no setor sul do Quadrilátero Ferrífero (QF), sendo essa região a menos estudada dessa província mineral (Figura 8).

Figura 8: Mapa Geológico da região sul do QF. Região sul está inserida a mina em estudo.



Fonte: modificado de ROSIÉRE E BAAS, 1997.

A mina está inserida no contato de uma sequência metavulcanossedimentar, pertencente ao Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas, com o Batólito do Maranhão (Figura 9). O Grupo Nova Lima é de idade Arqueana e foi dividido em três unidades, da base para o topo (ENDO, 1997): Unidade Metavulcânica, Unidade Metassedimentar Clástica e Unidade Metassedimentar Química. Esse estudo irá focar apenas na Unidade Metavulcano sedimentar, na qual está inserida a mina.

Figura 9: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.

Fonte: modificado de ALKMIN E MARSHACK, 1998.

2.6.2 Geologia local

A estruturação da mina tem direção NW-SE (Figura 10), sendo constituída por rochas metamórficas do Grupo Nova Lima e granitos do Batólito Alto Maranhão. Pode-se notar ainda coberturas saprolíticas presentes principalmente nas bancadas superiores.

Figura 10: Cava da mina vista de sudeste para noroeste.

Fonte: EMPRESA, 2014.

Segundo o mapeamento realizado, a área apresentou cinco unidades geológico-geotécnicas, distribuídas em dois domínios: rochas graníticas do Batólito Alto Maranhão e Grupo Nova Lima (Tabela 16). Algumas dessas rochas podem apresentar a variação friável como é o caso do Granodiorito, que receberá então um A após sua sigla.

Tabela 16: Domínio e unidades de mapeamento da mina estudada

DOMÍNIOS	UNIDADE DO MAPEAMENTO DA CAVA
Rochas graníticas do Batólito Alto Maranhão	Grano diorito (IGD)
	Anfibolito (IAF)
Rochas do Grupo Nova Lima	Minério Sílico-Carbonatado (MSC)
	Xisto grafitoso (XGT)
	Quartzo Biotita Xisto (XQB)

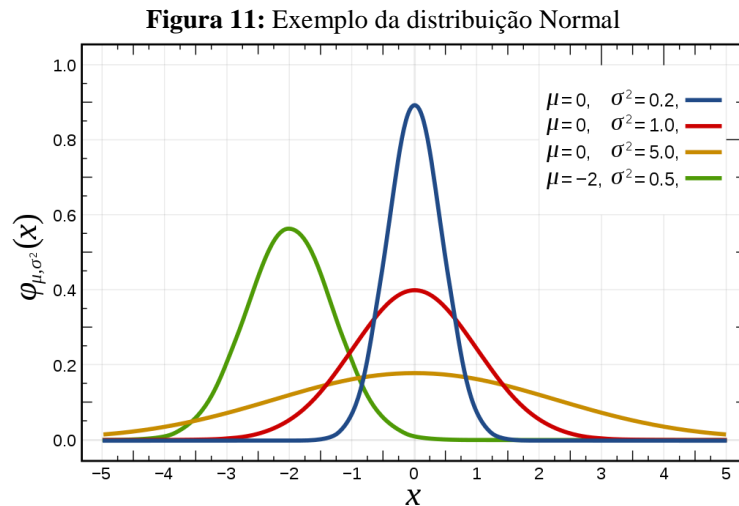
Fonte: EMPRESA, 2014.

2.7 Distribuições estatísticas e testes de hipóteses

2.7.1 Distribuições estatísticas

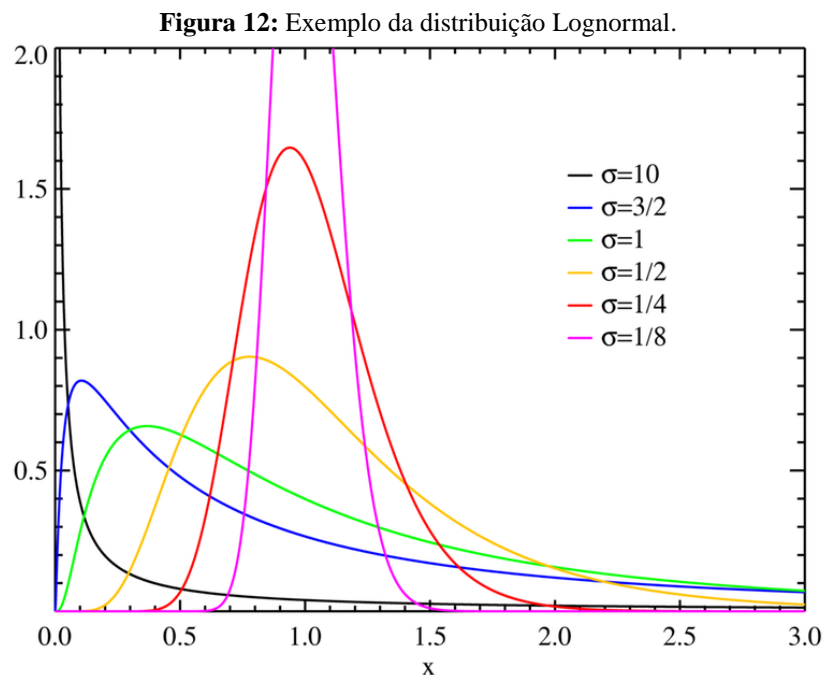
Nesse trabalho foram realizadas cinco tipos de distribuições que posteriormente foram testadas para as hipóteses sugeridas. As distribuições feitas foram a normal, lognormal, exponencial, Weibull e Gama.

A distribuição normal é uma distribuição de probabilidade absolutamente contínua parametrizada pela sua esperança matemática e desvio padrão. Normalmente seu gráfico apresenta a forma de sino. A Figura 11 mostra um exemplo de distribuição normal (WIKIPEDIA, 2019).



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_normal (2019).

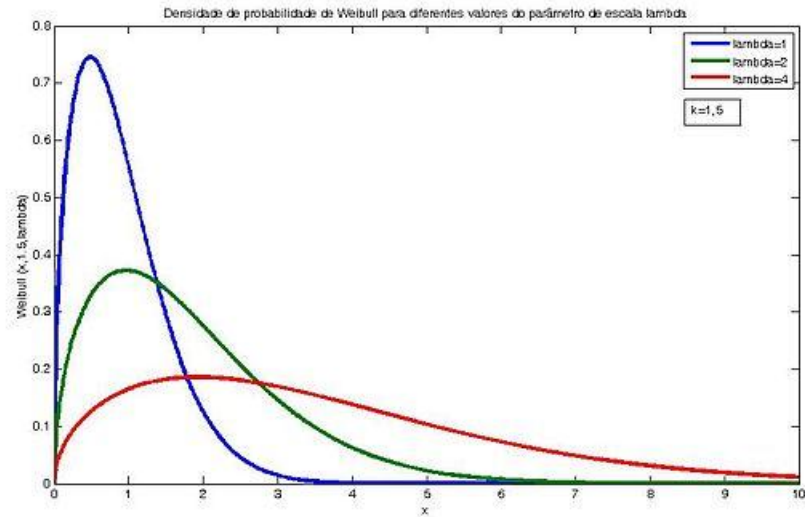
Para que a distribuição seja lognormal o logaritmo da variável em análise deve ser distribuída normalmente. O aspecto do gráfico dessa distribuição pode ser visto na Figura 12.



Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_log-normal (2019).

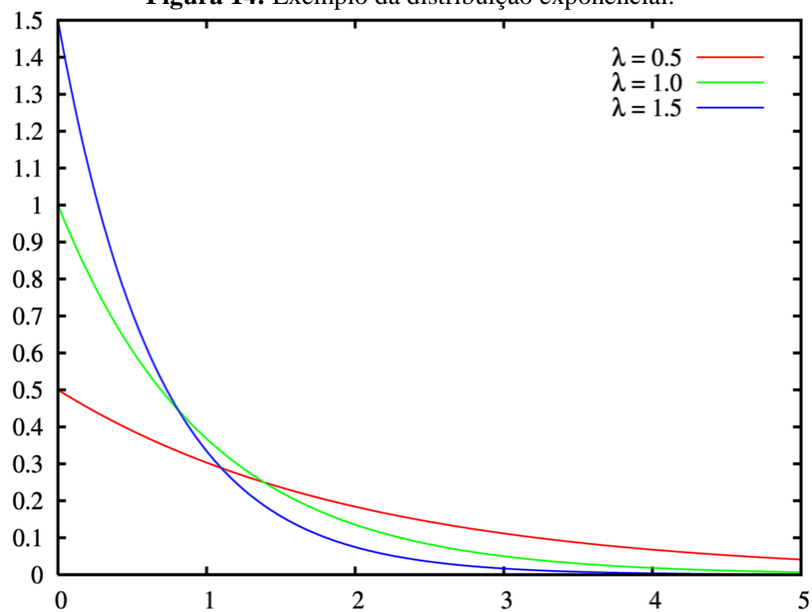
O padrão dos gráficos as distribuições Weibull, exponencial e gama são apresentados nas Figuras 13, 14 e 15, respectivamente.

Figura 13: Exemplo da distribuição Weibull.

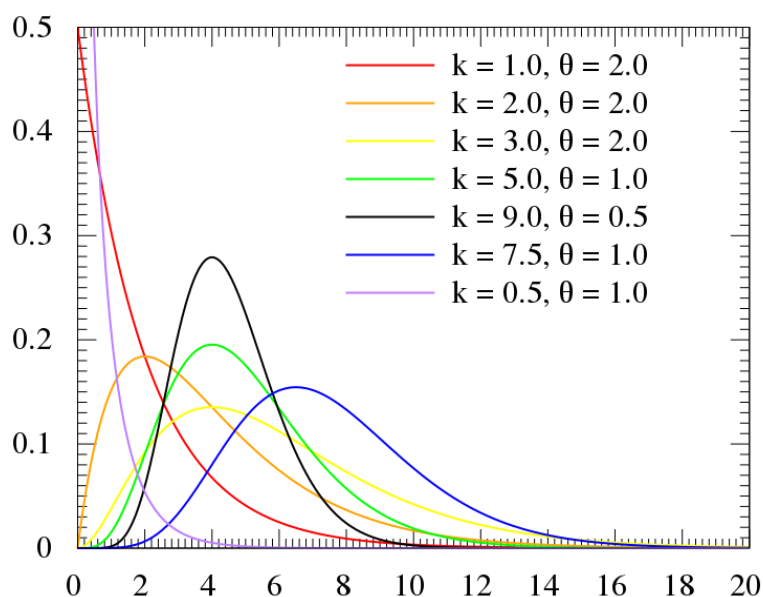


Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki>, (2019).

Figura 14: Exemplo da distribuição exponencial.



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki>, (2019).

Figura 15: Exemplo da distribuição gama.

Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki>, (2019).

2.7.2 Testes KS, normalidade de Shapiro-Wilk e Qui-quadrado

Esses testes são usados para verificar se um conjunto de dados segue ou não determinado tipo de distribuição estatística. Considera a hipótese H_0 (inicial) quando os dados seguem determinada distribuição e H_a (alternativa) quando não atendem a essa distribuição (BRUZZI, 2019). Entende-se por hipótese como um conjunto de condições iniciais num processo de demonstração, resultado e teste. As condições adotadas são $p\text{-value} > 0,05$ (alfa), não rejeitamos a hipótese H_0 . Portanto se $p\text{-value} \leq 0,05$ (alfa), rejeitamos a hipótese H_0 e recai na hipótese alternativa (H_a).

Existem diversos testes disponíveis, porém nesse trabalho se utilizou os testes Kolmogorov-Smirnov (KS), Shapiro-Wilk e Qui-Quadrado (χ^2). O teste KS compara uma função de distribuição empírica com uma função de distribuição teórica. É um teste que não necessita de agrupamento de classes, logo é preciso definir intervalos. Já o teste Qui-Quadrado deseja comparar o histograma de um conjunto de amostras com a função densidade de probabilidade. A literatura considera o teste KS mais poderoso que o Qui-Quadrado, porém é mais limitado. Já o teste Shapiro-Wilk é usado para identificar com certa confiança se a amostra ou conjunto de dados segue a distribuição normal. É usado somente para a distribuição normal (MELLO & PETERNELLI, 2013).

Nessa pesquisa os testes foram usados somente para verificar a veracidade da hipótese de uma determinada distribuição, não entrando em detalhes maiores. Considerou-se o nível de significância de 5% e todas as distribuições que apresentaram *p-value* menor que esse valor foram rejeitadas. O Anexo 3 mostra os *scripts* realizados no *software* R (MELLO E PETERNELLI,2013) para todos os testes usados nesse trabalho.

3 METODOLOGIA E ESTRATÉGIAS DE AÇÃO

3.1 Levantamento bibliográfico, compilação e análise de dados

Essa etapa, em um primeiro momento, consistiu no levantamento bibliográfico e revisão da literatura acerca de conceitos e características fundamentais para descrever descontinuidades, classificações geomecânicas, critérios de resistência de Hoek-Brown e Barton-Bandis, análises estatísticas e análises cinemáticas. O objetivo é compor a pesquisa e subsidiar informações para a correta caracterização dos maciços rochosos e descontinuidades presentes na mina estudada.

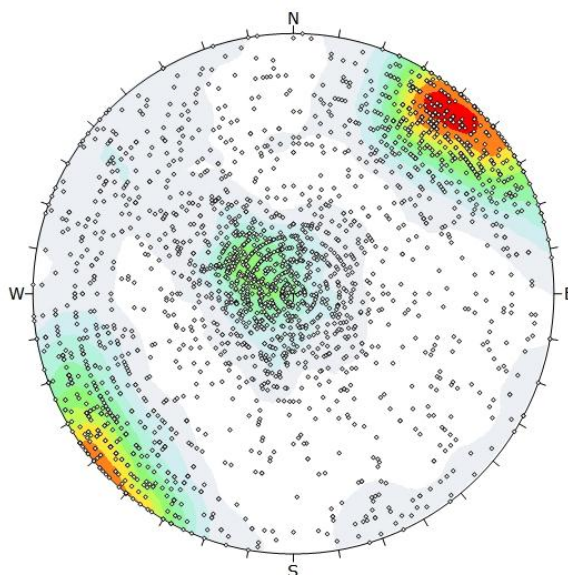
Em um segundo momento, foi realizada a compilação e análise do banco de dados fornecidos pela empresa, que é resultado do mapeamento geológico-geotécnico realizado pela mesma, com um total de 2331 dados de descontinuidades com descrições sobre a alteração, resistência das paredes, rugosidade, persistência, espaçamento, litologia, abertura, tipo de estrutura e orientação dos planos de descontinuidade.

Os dados do mapeamento foram divididos pela empresa em setores, com base nas características supracitadas, além de levar em consideração as direções do talude global e o de bancada. Foram subdivididos em subsetores A e B, que correspondem respectivamente às regiões de domínio terroso e rochoso. Nesse trabalho será considerada somente a região de domínio rochoso. Além disso, outros dados foram fornecidos pela empresa, como por exemplo, a orientação do talude norte, no qual está inserido o setor 1B, que será foco dessa pesquisa.

3.2 Definição das famílias de descontinuidades

O método clássico de agrupamento de famílias de descontinuidades é o diagrama de frequência de polos, comumente feito no software *Dips* da Rocscience (2013). Porém, devido ao grande número de dados, nesse software os polos ficam muito dispersos, dificultando a definição das famílias (Figura 16).

Figura 16: Diagrama de frequência dos polos referentes aos 2331 dados, feito no *Dips* da Rocscience.



Fonte: O autor.

Sendo assim, para a definição das famílias de descontinuidades foi usado o algoritmo desenvolvido por Klen (2015) denominado Heurística, que foi baseado no método *Fuzzy K-Means*. Esse autor fez uso da plataforma Scilab para desenvolver esse algoritmo que utiliza alguns parâmetros chaves como o número de agrupamentos K , os centros de inicializações de cada agrupamento, medida de distância entre duas descontinuidades, forma de calcular as atitudes médias das famílias, identificação dos *outliers* e identificação das regiões de sobreposição (KLEN, 2015).

O Heurística tem como parâmetros de entrada a orientação das descontinuidades, o número de agrupamentos que se deseja gerar e o limite mínimo de inclusão de uma descontinuidade em uma família, que nesse caso foi adotado como 0,6, de acordo com a sugestão de Klen (2015).

Os dados de saída são o número ideal de famílias de descontinuidades, quais são e quantos são os elementos que compõem cada uma e as atitudes médias de cada família.

3.3 Caracterização geológico-geotécnica das descontinuidades

Para essa etapa usou-se o software *Dips* da Rocscience (2013), no qual foram selecionados os histogramas de cada família de descontinuidade, correspondente às características de resistência das paredes e alteração do maciço, espaçamento,

persistência, rugosidade, abertura e preenchimento. Essas características foram analisadas para cada família para posteriormente se concluir as características gerais das descontinuidades. Essa mesma análise também foi realizada para as descontinuidades compreendidas no setor 1B. Para caracterizar as descontinuidades considerou-se a classificação de Bieniawski (1989) e da ISRM (2007).

3.4 Análise e distribuição estatística dos dados

Essa etapa consistiu em realizar a análise descritiva e distribuição estatística de todos os dados de espaçamento fornecidos pelo mapeamento, utilizando o ambiente computacional e a linguagem de programação R. A escolha do espaçamento como a variável de análise se deve à importância que essa característica tem sobre a qualidade mecânica e hidrogeotécnica dos maciços. Primeiramente foram obtidos os valores de média, mediana, moda, variância e desvio padrão, utilizando rotinas de programação específicas do programa R. Posteriormente, foram testadas as distribuições normal, lognormal, exponencial, gama e de Weibull, e devidos testes estatísticos, tais como Teste de Shapiro-Wilk, Teste Kolmogorov-Smirnov (KS) e Teste Qui-Quadrado, para verificar o tipo de distribuição dos dados do espaçamento.

3.5 Definição dos parâmetros do critério de Hoek-Brown e Barton-Bandis

Com base nos dados disponíveis pelo mapeamento geológico-geotécnico foram definidos os parâmetros de resistência dos critérios de Hoek-Brown e Barton-Bandis do setor 1B, definido pela empresa A escolha por esse setor ocorre devido a uma ruptura ocorrida nesse local em 2013, que paralisou as atividades da mina por um ano. Para determinar os parâmetros do critério de Hoek-Brown foi necessário calcular o RMR (*Rock Mass Rating*), o GSI (*Geological Strength Index*) e por fim calcular o s e a . Já para o critério de Bartons-Bandis definiu-se o JRC (coeficiente de rugosidade da junta), o JCS (resistência à compressão da rocha na superfície da descontinuidade) e o ângulo de atrito residual (ϕ_r), utilizando fórmulas matemáticas. Para ambos os casos as fórmulas e as tabelas do Sistema de classificação geomecânica RMR foram definidas e apresentadas no capítulo de *Referencial Teórico* desse trabalho.

3.6 Análise cinemática do setor 1B

Pelo mesmo motivo citado no item anterior foi escolhido o setor 1B para realizar as análises cinemáticas, agora realizadas no *Dips*. Inicialmente, redefiniram-se as

famílias para esse setor, e posteriormente a análise cinemática foi feita. Foi realizada a análise cinemática para o talude de bancada e para o talude global, que apresentam planos médios de 212/61 e 212/38, respectivamente. Ambos os dados foram definidos em mapeamento de campo realizado pela empresa. Para o ângulo de atrito (ϕ) usou-se a relação da equação 8 do capítulo 2 (relação do J_r e J_a). As análises realizadas foram para tombamento flexural, tombamento de blocos, planar e em cunha.

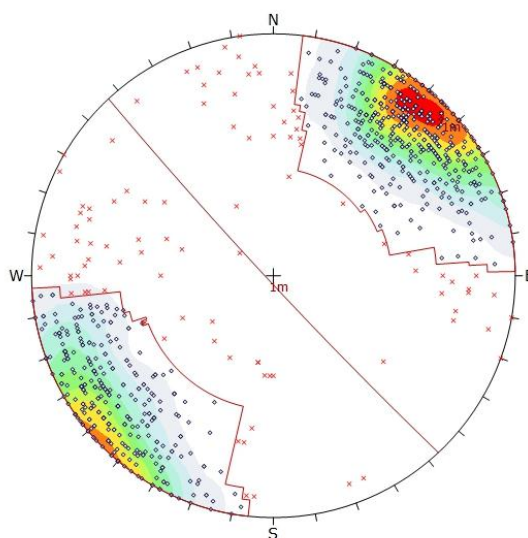
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Definição das famílias de descontinuidades e características

4.1.1 Família 1

Segundo a classificação do Heurística a família 1 corresponde a foliação milonítica descrita pela empresa. Na área mapeada encontrou-se 912 pontos com essa estrutura. As direções principais observadas mostram um *trend* NW-SE, com mergulho geral para SW. O valor médio da orientação para essa família foi de 226/86. A Figura 17 mostra a distribuição de polos e a localização do plano médio para essa estrutura definidos no *Dips*.

Figura 17: Distribuição de polos da família 1 realizada no *Dips*.



Fonte: o autor.

Essa família ocorre principalmente no quartzo-biotita xisto (XQB), na qual das 912 descontinuidades, 463 ocorrem nesse litotipo. Seguido do XQB, tem-se o Minério Sílico Carbonatado (MSC), com 142 descontinuidades e em terceiro tem-se o Granodiorito (IGD) com 94 descontinuidades. A foliação também ocorre em outros litotipos da cava, porém com menor expressividade (ANEXO 1).

A resistência das paredes predominante nessa família foi muito forte (R5). Quanto à alteração, predomina a classificação de levemente intemperizado (W2), seguido de rocha sã (W1). Para o espaçamento notou-se que a maioria das descontinuidades está

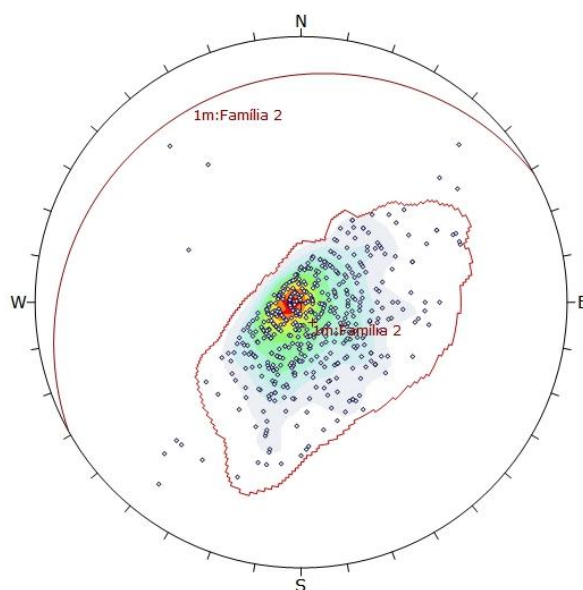
inserida na categoria L3 de Bieniawski (1989), definido como medianamente afastada, com valores entre 0,2 a 0,5 m, predominando 0,3 metros (199 descontinuidades).

Das 912 descontinuidades, 755 delas possuem persistência dominante da ordem de 20 metros. A abertura dominante nessa família foi de 1 a 5mm, com 309 das estruturas inseridas nessa faixa, porém números expressivos de descontinuidades apresentam aberturas de 0,1 a 1 mm (170 descontinuidades) e maiores que 5 mm (258 descontinuidades). Quanto à rugosidade, 631 descontinuidades são levemente rugosa. Por se tratar de uma foliação, a maioria das descontinuidades dessa família não apresenta preenchimento algum (752). (ANEXO 1).

4.1.2 Família 2

A família 2 corresponde a fraturas com *trend* de NE-SW, mergulhando para NW e plano médio de 331/10. (Figura 18). Essa estrutura será denominada de fratura 1. Encontrou-se na área mapeada 517 descontinuidades pertencentes a essa família. As litologias dominantes foram o XQB (262 descontinuidades), seguido do MSC (114 descontinuidades) e em terceiro o IGD (42 descontinuidades). Além dessas, outras litologias aparecem, porém com menor expressividade.

Figura 18: Distribuição de polos da família 2 realizada no *Dips*.



Fonte: O autor.

Assim como na família 1, a resistência a compressão das paredes que predomina é a R5 (muito forte), aparecendo 189 descontinuidades agrupadas nesse caso. Ademais, 147 e 94 descontinuidades foram classificadas como R6 e R4, respectivamente. Das 517 descontinuidades, 321 se apresentam levemente rugosas e 171 rugosas. Como lisa e muito rugosa apareceram poucas descontinuidades, não sendo significativo nesse caso. Quanto ao estado de alteração pode ser classificado como levemente intemperizado (W2) e a persistência vai de 3 a 10 m.

As estruturas dessa família apresentam espaçamentos variando de 0,1 a 0,8 metros, podendo ser classificadas como L2 a L3. As aberturas ficam na faixa de 1 a 5 mm e em alguns casos apresentam aberturas maiores que 5 mm. Quanto ao preenchimento, 380 descontinuidades não exibem essa característica, e em torno de 100 delas apresentam um preenchimento variando de duro a macio (ANEXO 1).

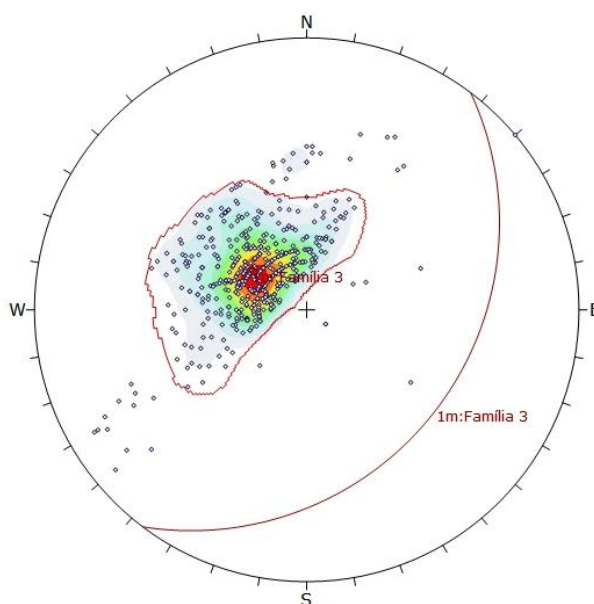
4.1.3 Família 3

O *trend* da família 3 é o NE-SW, com mergulho para SE. O plano médio nesse caso é o 127/28 (Figura 19). Assim como na família 2, a família 3 é representada em totalidade por fraturas, que nesse caso será denominado de fratura 2. Foram encontradas na área mapeada 490 descontinuidades pertencentes a essa família. As litologias dominantes foram o XQB (262 descontinuidades) seguido do MSC (114 descontinuidades) e em terceiro o IGD (42 descontinuidades). Além desses, outras litologias apareceram, todavia com menor expressividade.

A resistência das paredes das descontinuidades dessa família se agrupa na classificação R5 (159) e R6 (148), mostrando assim ser um maciço muito resistente. Quanto ao grau de alteração foi classificada como levemente intemperizada (W2) a sã (W1), com poucas descontinuidades inseridas nas outras classes de alteração.

O espaçamento entre as descontinuidades está na faixa de 0,1 a 0,9 metros, com predominância de estruturas espaçadas de 0,5 metros. Sendo assim, de acordo com a classificação de Bieniawski (1989), essa família está inserida na categoria L3 (medianamente afastadas) a L2 (afastadas).

Figura 19: Distribuição de polos da família 3 realizada no Dips.



Fonte: O autor.

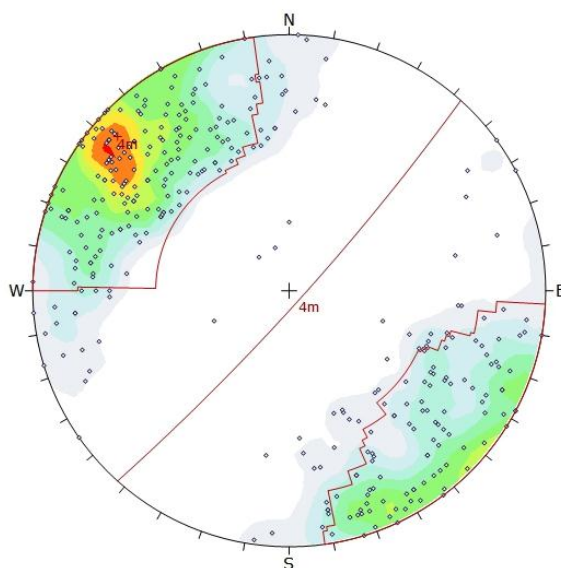
As descontinuidades dessa família possuem uma ampla faixa de distribuição de persistência, variando de 1 a 20 metros. Na faixa de 1 a 3 m possuem 144 estruturas, na faixa de 3 a 10 m possuem 135 e maiores que 20 metros possuem 138. A causa dessa variação pode estar associada ao tipo de rocha que essas estruturas estão cortando, ou seja, rochas mais resistentes apresentaram uma extensão de traço menor e em rochas menos resistentes os traços serão maiores.

Para a rugosidade nota-se que 274 descontinuidades se apresentam levemente rugosas ao passo que 205 delas foram classificadas como rugosas. As descontinuidades possuem aberturas na faixa de 1 a 5mm e com a grande maioria sem preenchimento algum. As características citadas aqui podem ser vistas nos histogramas do Anexo 1.

4.1.4 Família 4

A família 4 apresenta o *trend* NE-SW, com um alto mergulho para SE. O plano médio nesse caso é o 132/84. Também é representado por fraturas e nesse caso será chamada de fratura 3. Foram encontradas na área mapeada 342 descontinuidades pertencentes a essa família (Figura 20).

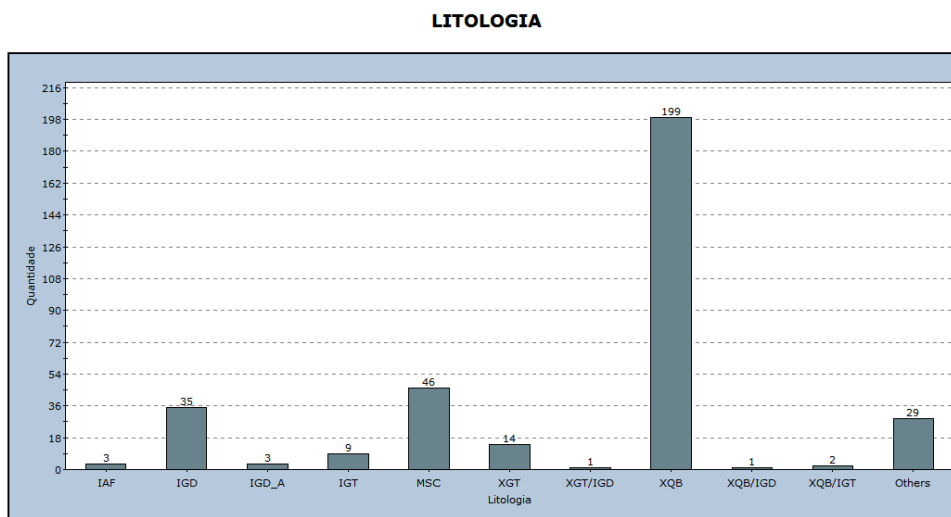
Figura 20: Distribuição de polos da família 4 realizada no Dips.



Fonte: O autor.

A maioria das fraturas dessa família está distribuída no litotipo quartzo-biotita xisto (XBQ), tendo 199 descontinuidades inseridas nesse caso. Porém possuem representantes nos outros litotipos mapeados. Entre as 8 famílias classificadas, é na família 4 que ocorre a maior variação das descontinuidades distribuídas entre os litotipos mapeados como pode-se verificar na Figura 21.

Figura 21: Histograma de distribuição de litologia das descontinuidades da família 4.



Fonte: O autor.

Quanto às características de resistência das paredes, 122 descontinuidades foram classificadas como muito forte (R5), 76 como forte (R4) e 61 como extremamente forte (R6). Já para a alteração das paredes, a maioria das descontinuidades (212) está

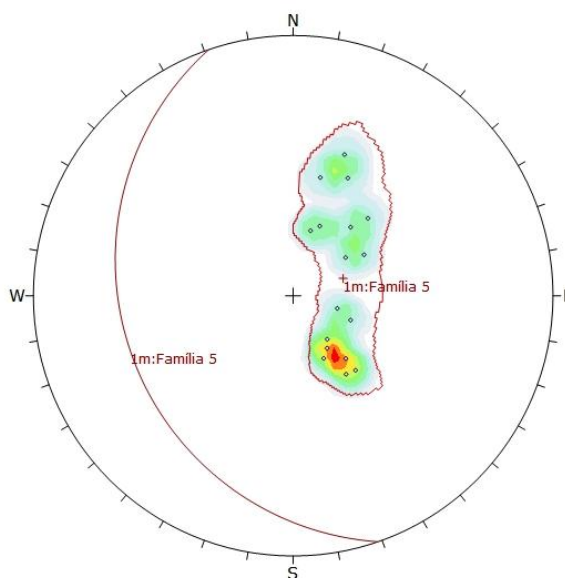
inserida em rochas levemente intemperizadas (W2). Essa família pode ser considerada pouco persistente, pois aproximadamente 84% das discontinuidades possuem extensão menor que 10m (188 de 3 a 10 metros e 101 de 1 a 3 metros). Acima de 10 metros, 50 discontinuidades possuem extensão do traço maior.

Quanto à rugosidade, as discontinuidades dessa família se apresentam levemente rugosas (205) a rugosas (113). Duzentas e quatorzes (214) fraturas dessas famílias apresentam abertura variando de 1 a 5mm e possuem a maioria delas sem nenhum preenchimento. De maneira geral, as fraturas se encontram espaçadas de dimensões métricas, com dominância de 0,4m a 0,6m, ou seja, medianamente afastadas (L3).

4.1.5 Família 5

O *trend* dessa família é NW-SE, com mergulho para SW. O plano médio nesse caso é o 251/23 (Figura 22). Nesse caso as estruturas mapeadas se tratam de falhas, perfazendo um total de 17 delas. Foi denominada de falha 1 para diferenciar das demais falhas que possuem características diferentes e que serão descritas a seguir.

Figura 22: Distribuição de polos da família 5 realizada no Dips.



Fonte: O autor.

Das 17 falhas mapeadas, 10 estão inseridas na litologia XQB, seguido de três na MSC e as demais distribuídas na IGD e na XGT. A classe de resistência predominante foi a R5, com 11 discontinuidades classificadas nesse caso. Quanto ao espaçamento entre as discontinuidades, verifica-se que ocorre uma distribuição bastante heterogênea,

variando de 0,5 a 20 m, predominando espaçamento de 20 e 5 metros (ANEXO 1). Essa faixa de classificação permite dizer que as descontinuidades estão muito afastadas, segundo categoria L1 de Bieniawski (1989).

A ampla variação nos intervalos do espaçamento pode ocorrer devido à pequena representatividade dos dados, pela falta de precisão das medidas em campo ou por se tratar de falhas, estruturas que acabam sendo menos frequentes que os outros tipos de estruturas.

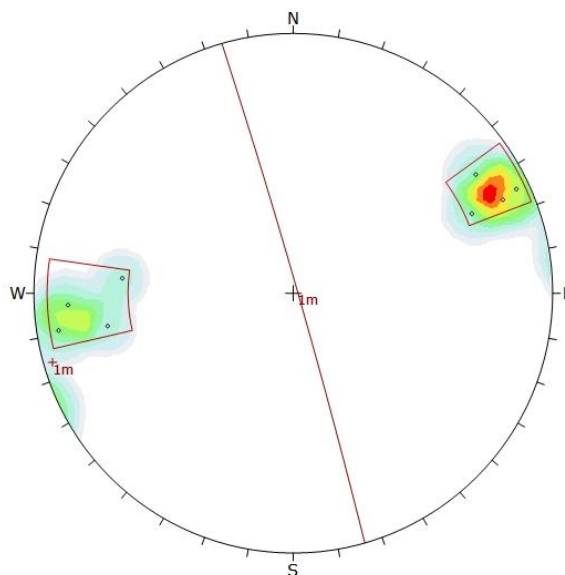
As falhas 1 estão inseridas em maciços classificados como levemente intemperizados (W2), tendo 15 estruturas nesse contexto. Com relação à abertura, prevalece a existência de 15 falhas com aberturas maiores que 5 mm e preenchimento variando de duro a macio. Quanto à rugosidade variam de levemente rugosas a rugosas.

4.1.6 Família 6

A família 6 possui *trend* de NW-SE, com mergulhos praticamente verticalizados. O plano médio nesse caso é o 74/88 (Figura 23). As estruturas inseridas nessa família são falhas e serão chamadas de falha 2. Foram encontradas somente oito descontinuidades nesse contexto. Essa estrutura é encontrada principalmente no XQB, mas por vezes também aparece na porção da região mineralizada (MSC). Está inserida em rochas classificadas como muito fortes (R5) e levemente intemperizadas (W2). As falhas estão espaçadas de 5 a 15 metros (L1) com persistência de até mais de 20 metros.

As falhas 2 mapeadas possuem em sua totalidade aberturas maiores que 5 milímetros, com preenchimento macio. A rugosidade das paredes foi classificada como levemente rugosa.

Figura 23: Distribuição de polos da família 6 realizada no Dips.



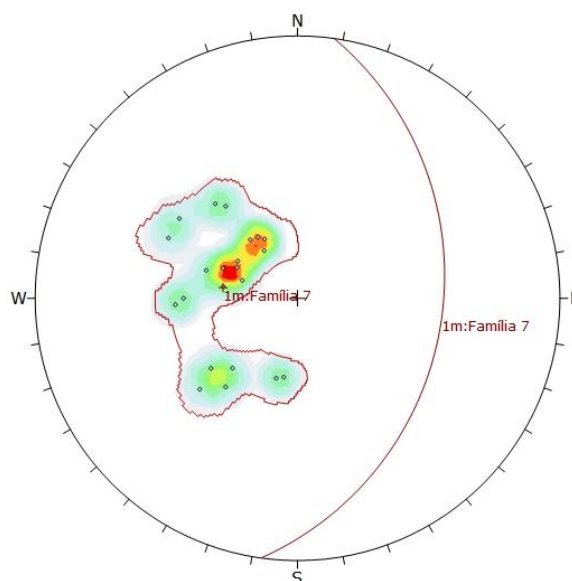
Fonte: O autor.

4.1.7 Família 7

A família 7 é representada por 22 falhas com *trend* de NE-SW e mergulho para SE e possui plano médio de 98/32 (Figura 24). As estruturas dessa família foram nomeadas de falha 3 para diferenciar das demais falhas encontradas na cava.

Essas falhas foram encontradas predominantemente no Granodiorito Compactado (IGD), com 10 estruturas presentes nessa litologia. As outras 12 falhas foram distribuídas no MSC e no XBQ. Assim como nas outras famílias os maciços se mostram levemente intemperizados (W2) e como grau de resistência muito forte (R5). As discontinuidades estão espaçadas de aproximadamente 20 metros e com alta persistência, predominando falhas com a extensão do traço maiores que 20 metros. As paredes das falhas se encontram rugosas a levemente rugosas e possuem aberturas de aproximadamente 5 mm. Não ocorre preenchimento dessas estruturas.

Figura 24: Distribuição de polos da família 7 realizada no Dips.



Fonte: O autor.

4.1.8 Família 8

A família 8 está representada por contatos litológicos e foram mapeadas 23 pontos que possuem *trend* NE-SW, com mergulho para NW. O plano médio é o 321/60. As descontinuidades dessa família se encontram predominantemente no granitoide compactado (IGT) e no minério sílico carbonatado (MSC). Quanto ao grau de alteração, a maioria dos pontos mapeados foi inserido na classificação W2 da ISRM, ou seja, levemente intemperizado, contudo algumas das estruturas mapeadas foram associadas a rochas sãs (W1). Para a resistência das paredes o resultado que predominou foi a classificação R5 (muito forte).

De acordo com os dados fornecidos e após a análise das características das descontinuidades dessa família, elas podem ser classificadas como pouco persistentes, visto que a maiorias das estruturas mapeadas nesse caso apresentaram extensão do traço entre 3 e 10 metros. Porém, esse fato gera certa estranheza por ser tratar de contatos litológicos. As paredes das descontinuidades se apresentam rugosas (16) a levemente rugosas (7), com a maioria delas sem abertura e sem preenchimento. Quanto ao espaçamento podem ser classificadas na categoria L1, porém vale observar que ocorrem uma grande variação nos espaçamentos dessa família. A Tabela 17 mostra o resumo das características predominantes das descontinuidades estudadas.

Tabela 17: Resumo das características predominantes das descontinuidades.

Família	Estrutura	Orientação	Litologia predominante	Resistência	Alteração	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento
Família 1	foliação	226/86	XQB, MSC, IGD	R5	W2	L3	>20m	1-5mm	levemente rugosa	nenhum
Família 2	fratura 1	331/10	XQB, MSC, IGD	R5	W2	L2, L3	3 -10m	1-5mm	levemente rugosa	nenhum
Família 3	fratura 2	127/28	XQB, MSC, IGD	R5, R6	W2,W1	L2, L3	Quase todas as faixas	1-5mm	levemente rugosa	nenhum
Família 4	fratura 3	132/84	XQB	R5	W2	L3	<10	1-5mm	levemente rugosa	nenhum
Família 5	falha 1	251/23	XQB, MSC, IGD,XGT	R5	W2	L1	>20m	>5mm	levemente rugosa a rugosa	duro a macio
Família 6	falha 2	74/88	XQB, MSC	R5	W2	L1	>20m	>5mm	levemente rugosa	macio
Família 7	falha 3	98/32	IGD, MSC, XQB	R5	W2	L1	>20m	5mm	rugosa a levemente rugosa	nenhum
Família 8	contato litológico	321/60	IGT, MSC	R5	W2	L1	3-10m	nenhum	rugosa a levemente rugosa	nenhum

Fonte: o autor.

4.2 Análise e distribuição estatística dos dados

A análise estatística dos dados foi realizada para a variável espaçamento. O número de dados analisados foi de 2331. Após a análise estatística, realizada através de rotinas de programação no *software* R, obteve-se os resultados para medidas de posição e de dispersão, indicados na Tabela 18.

Tabela 18: Resultados da análise estatística dos dados de espaçamento.

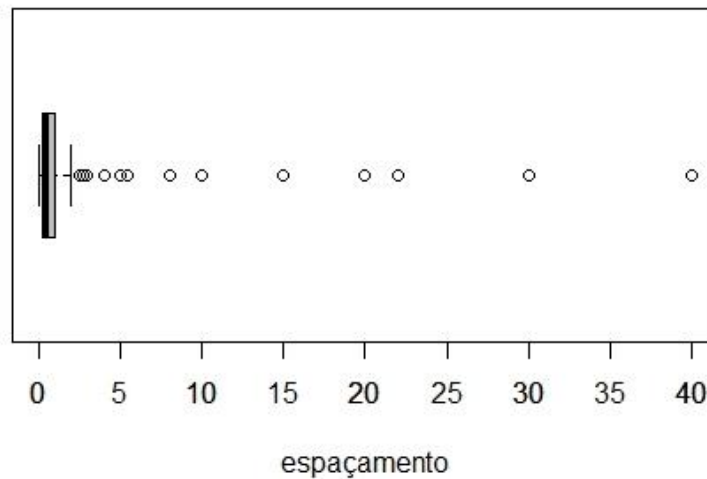
Medidas de posição				
Média (m)	Mediana (m)	Moda (m)	1° Quartil	3° Quartil
1,0264	0,5	0,5	0,3	1
Medidas de dispersão				
Amplitude (m)	Desvio padrão(m)	Variância (m ²)	Coeficiente de variação	
39,95	2,5180	6,340	Não aplica	

Fonte: o autor.

Esses valores mostram que a distribuição não é simétrica, pois apesar da moda e da mediana apresentarem o mesmo valor, a média possui um valor diferente e maior. Esse fato já é uma evidência de que a distribuição não é do tipo normal. Observa-se pela Tabela 17 que o desvio padrão é maior que a média, mostrando que a amostra é mais heterogênea. Esse fato é confirmado pelo coeficiente de variação. O cálculo desse fator no R não obteve nenhuma resposta, pois o algoritmo do programa só retorna para o coeficiente de variação valores entre 0 e 1. Como o desvio padrão é maior que a média não foi possível nesse caso. Sendo assim, conclui-se que a amostra possui um alto grau de dispersão.

O gráfico do tipo *box plot* representado na Figura 25 mostra outros valores de posição como o mínimo (0,05), o máximo considerando os *outliers* (2), 1° quartil (0,30) e 3° quartil (1). Além disso, foi possível calcular a amplitude e a variância (Tabela 17).

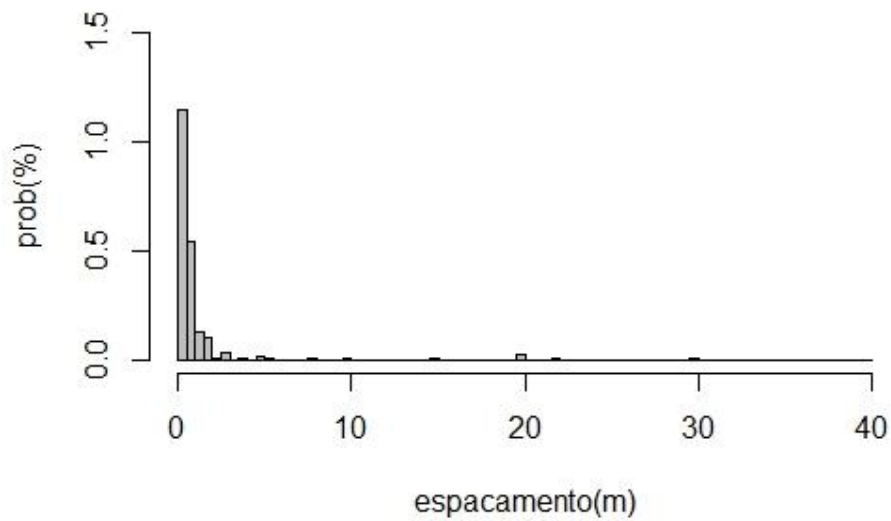
Figura 25: Representação gráfica dos dados do espaçamento em *box plot*.



Fonte: o autor.

O histograma da Figura 26 feito no *software* R mostra a distribuição dos dados. Nota-se a nítida assimetria da distribuição dos valores, com os valores mais altos sendo mascarados. Entretanto, nesse caso, os valores altos (*outliers*) podem ser muito significantes, visto que se trata da variável espaçamento. É possível observar também que a maioria dos valores dessa variável se concentra entre 0 e 1 metros.

Quanto maior a amostra, mais o histograma se parecerá com a forma da distribuição da população. Nesse caso, como estamos analisando 2331 dados, pode-se dizer que se trata de uma amostra grande e nota-se que o aspecto do histograma não se parece com o da distribuição normal. Esse é mais um indício de que os dados não seguem esse tipo de distribuição.

Figura 26: Histograma dos dados do espaçamento

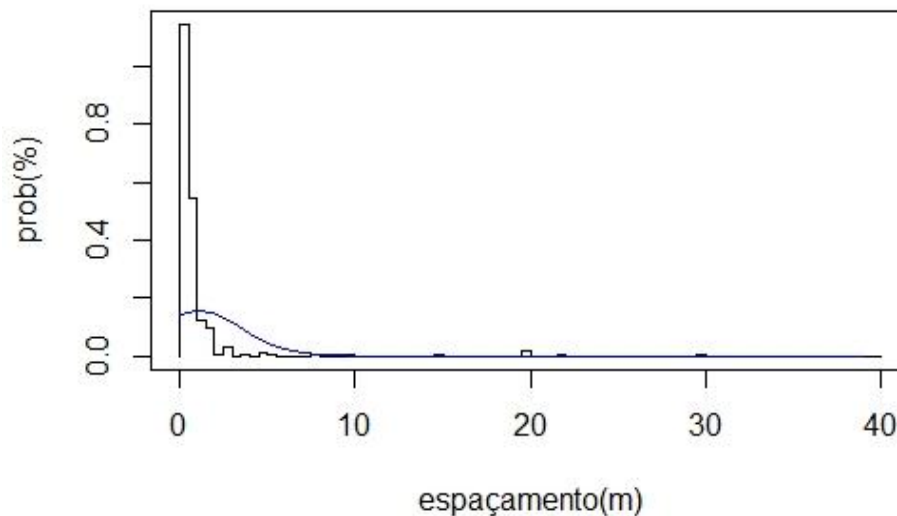
Fonte: o autor.

Por essa razão os dados foram testados para as distribuições lognormal, normal, Weibull, gama e exponencial, usando três testes estatísticos: Teste KS, Teste Shapiro-Wilk e Teste Qui Quadrado. Os resultados serão apresentados a seguir.

4.2.1 *Distribuições dos dados e testes estatísticos*

4.2.1.1 Distribuição normal

A Figura 27 mostra como ficaria a distribuição dos dados para distribuição normal. Foram geradas rotinas no R para se chegar a esse resultado e posteriormente os testes estatísticos foram executados para verificar se a distribuição poderia mesmo ser normal.

Figura 27: Gráfico da distribuição normal dos dados.

Fonte: o autor

Claramente os dados não seguem a distribuição normal e os testes realizados, que nesse caso foram o de Shapiro-Wilk e o Kolmogorov- Smirnov (KS) confirmam essa afirmação, pois o *p-value* é menor que o nível de significância adotado, que foi de 0,05 (5%) (Figuras 28 e 29).

Figura 28: Resultado para distribuição normal usando o teste Shapiro-Wilk.

```
shapiro-wilk normality test
data: Planilha2$`ESP (m)`
W = 0.26154, p-value < 2.2e-16
```

Fonte: o autor.

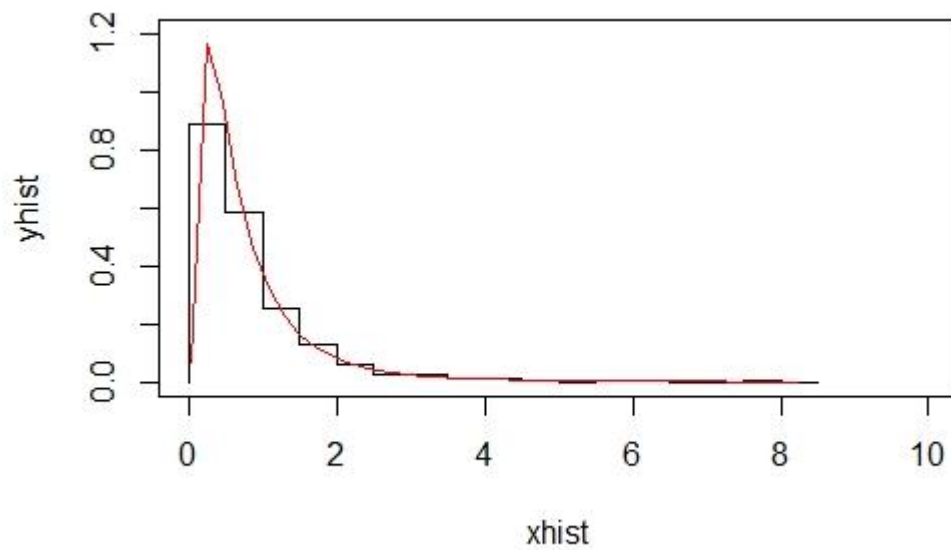
Figura 29: Resultado do teste estatístico KS para distribuição normal.

```
one-sample kolmogorov-smirnov test
data: Planilha2$`ESP (m)`
D+ = 0.34903, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: the CDF of x lies above the null hypothesis
```

Fonte: o autor.

4.2.1.2 Distribuição LogNormal

Para a distribuição lognormal a média e desvio padrão foram de $-0,56$ e $0,88$, respectivamente. Após análise estatística realizada no R, obtiveram-se o gráfico da Figura 30. Para verificar se a distribuição é realmente lognormal foi feito o teste Kolmogorov-Smirnov e teste Shapiro Wilk (Figura 31 e 32).

Figura 30: Gráficos da distribuição lognormal dos dados.

Fonte: o autor.

Ambos os testes estatísticos realizados mostraram que os dados não seguem uma distribuição lognormal, visto que o *p-value* é muito menor que o nível de significância fixada, ou seja, menor que 5% (Figura 31 e 32).

Figura 31: Resultado do teste KS para a distribuição LogNormal.

```

One-sample Kolmogorov-Smirnov test
data: Planilha2$`ESP (m)`
D^- = 0.096156, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: the CDF of x lies below the null hypothesis

```

Fonte: o autor.

Figura 32: Resultado do teste Shapiro-Wilk para a distribuição LogNormal.

```

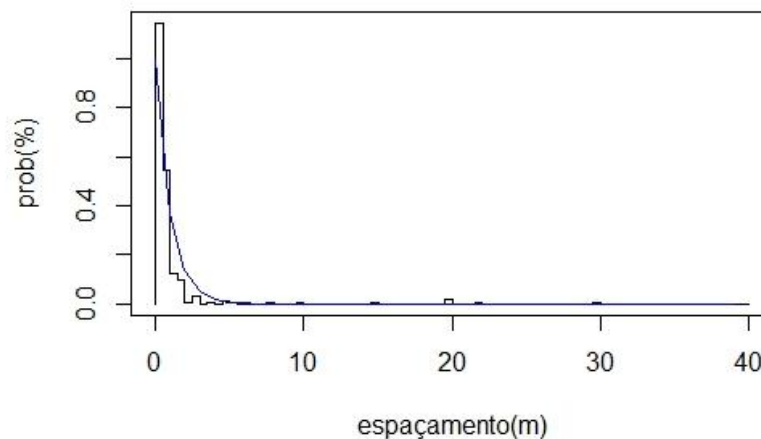
shapiro-wilk normality test
data: Planilha2$`ESP (m)`
W = 0.26154, p-value < 2.2e-16

```

Fonte: o autor.

4.2.1.3 Distribuição de Weibull

A Figura 33 mostra como ficaria a distribuição dos dados para distribuição Weibull.

Figura 33: Gráfico da distribuição Weibull dos dados.

Fonte: o autor.

A Figura 34 mostra os resultados do teste Qui Quadrado para a distribuição de Weibull. Nesse caso foram usados os parâmetros $\alpha=\beta=1$, onde α é o parâmetro escala e β é o parâmetro forma da distribuição. Nota-se que o valor da estatística foi de aproximadamente 618 com a curva de distribuição apresentando 1 grau de liberdade. O valor de *p-value* foi de 0, ou seja, menor que o nível de significância recomendando que de 5%. Logo os dados não seguem a distribuição de Weibull.

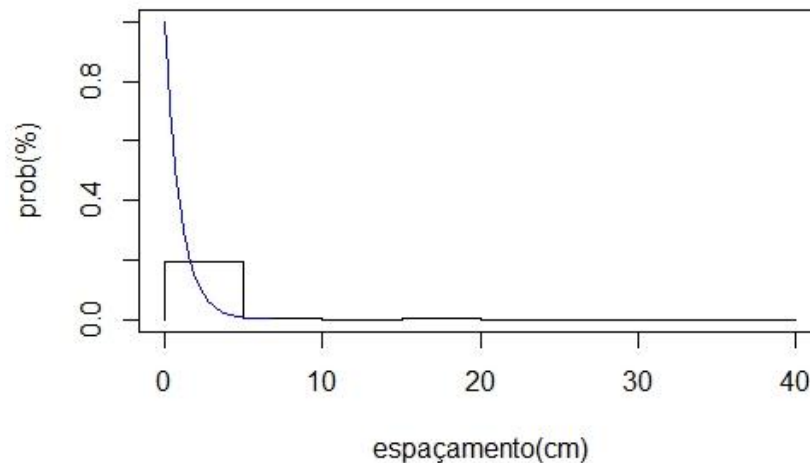
Figura 34: Resultado do teste Qui-quadrado para a distribuição de Weibull.

```
> x2
[1] 618.2455
> #graus de liberdade: n=k-1-m (k:nº de classes;m:parâmetros estimados)
> gdl<-4-1-2 ## degrees of freedom
> gdl
[1] 1
> # [1] 1
> 1-pchisq(x2,gdl) ## p-value
[1] 0
> # [1] 0
> pchisq(x2,gdl)
[1] 1
```

Fonte: O autor.

4.2.1.4 Distribuição Exponencial

O gráfico da Figura 35 mostra a distribuição exponencial dos dados. Para verificar se os dados seguem a distribuição exponencial foi realizado o teste KS e o Qui-Quadrado (Figura 36 e 37). Ambos os testes mostraram que os dados não seguem a distribuição exponencial, pois *p-value* é menor que o nível de significância de 5%.

Figura 35: Gráfico da distribuição exponencial

Fonte: o autor.

Figura 36: Resultado do teste KS para a distribuição exponencial.

```
> ks.test(Planilha2$`ESP (m)`,"pexp",rate=1)

one-sample kolmogorov-smirnov test

data: Planilha2$`ESP (m)`
D = 0.21172, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: two-sided
```

Fonte: o autor.

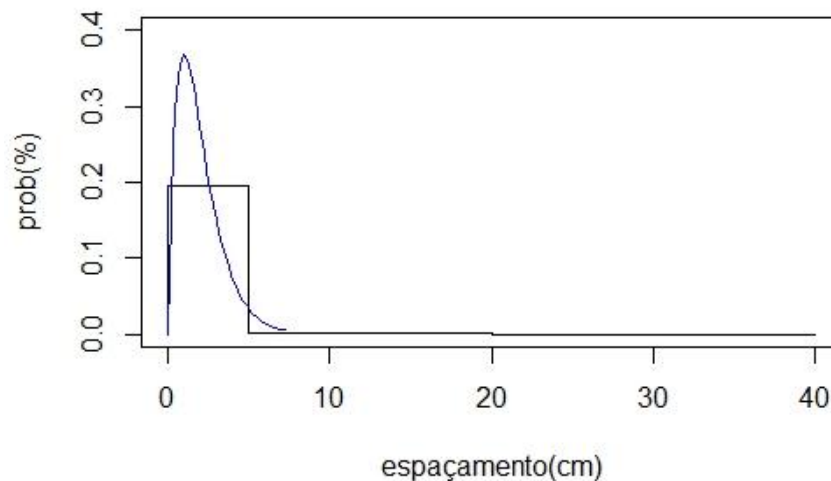
Figura 37: Resultado do teste Qui Quadrado para a distribuição exponencial.

```
> #Teste qui quadrado
> x2<-sum(((f.os-f.ex)^2)/f.ex) ## chi-square statistic
> gdl<-6-1-1 ## degrees of freedom
> 1-pchisq(x2,gdl) ## p-value
[1] 0
> pchisq(x2,gdl)
[1] 1
```

Fonte: o autor.

4.2.1.5 Distribuição Gama

A Figura 38 mostra o gráfico com a possível distribuição Gama dos dados. Para esse tipo de distribuição foram realizados os testes KS e Qui-Quadrado (Figura 39 e 40). Foi usado nesse caso $\alpha=\beta=1$.

Figura 38: Gráfico da distribuição Gama

Fonte: o autor.

Figura 39: Resultado do teste KS para a distribuição Gama.

```
> ks.test(Planilha2$`ESP (m)`,"pgamma",shape=1,scale=1)
```

```
one-sample kolmogorov-smirnov test
```

```
data: Planilha2$`ESP (m)`
D = 0.21172, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: two-sided
```

Fonte: o autor.

Figura 40: Resultado do teste Qui Quadrado para a distribuição Gama.

```
> f.ex<-c(2331,0,0,0,0) ## expected frequencies vector
> f.ex.f.ex<-c(2331,0,0,0,0) ## expected frequencies vector
> f.ex
[1] 2331 0 0 0 0
> x2<-sum(((f.os-f.ex)^2)/f.ex, na.rm = T) ## chi-square statistic
> x2
[1] Inf
> gdl<-6-1-2 ## degrees of freedom
> gdl
[1] 3
> 1-pchisq(x2,gdl) ## p-value
[1] 0
> # [1] 0
> pchisq(x2,gdl)
[1] 1
< |
```

Fonte: o autor.

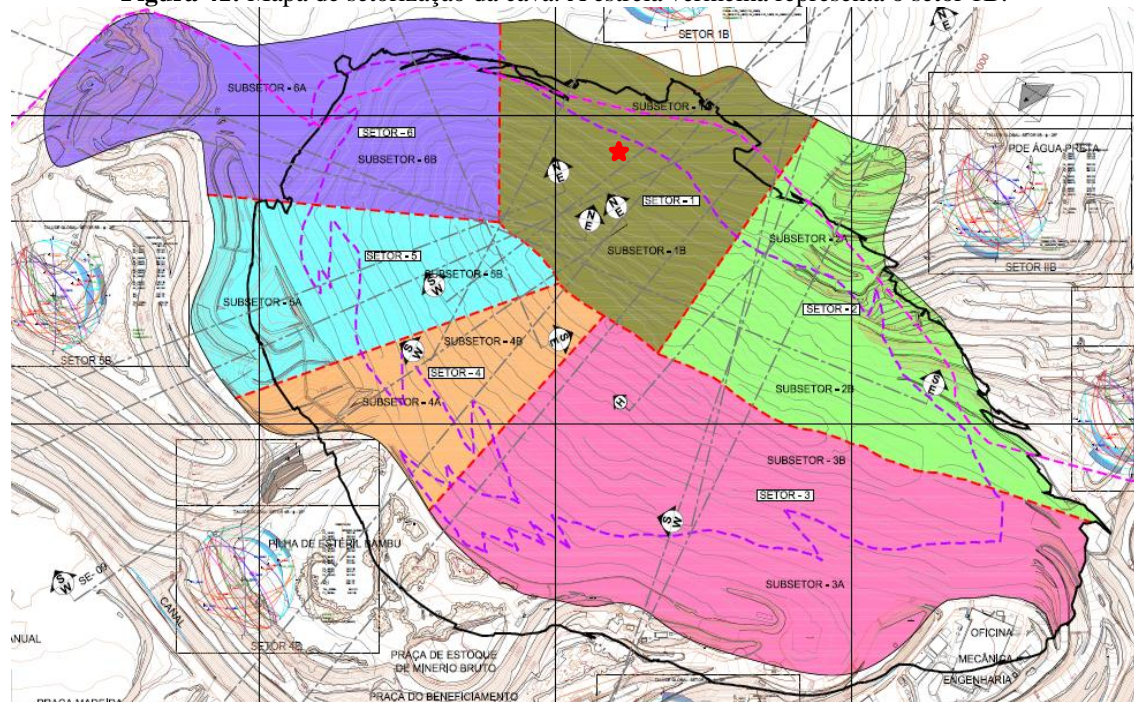
Ambos os testes mostraram que os dados não seguem a distribuição Gama, pois a *p-value* é menor que 5% (nível de significância adotado). Após realizar todos os testes propostos, nota-se que nenhuma das distribuições consideradas ocorreram. O valor de *p-value* mais próximo do nível de significância considerado foi para as distribuições Weibull e Gama (ambos com *p-value* igual a zero).

4.3 O setor 1B

4.3.1 Características gerais dos maciços e das descontinuidades

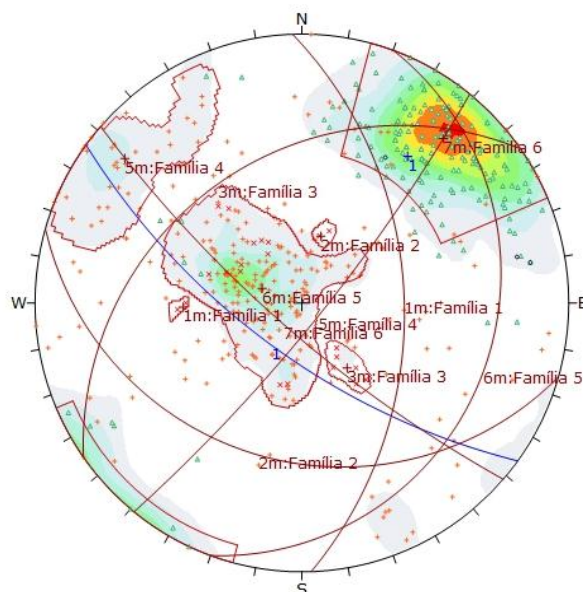
O setor 1B está localizado na região norte da cava e engloba o total de 501 descontinuidades mapeadas, sendo 22 classificadas como falhas, 3 como contato, 192 como foliação e 284 como fraturas (Figura 41):

Figura 41: Mapa de setorização da cava. A estrela vermelha representa o setor 1B.



Fonte: EMPRESA, 2014.

Para esse setor foi necessário reagrupar as descontinuidades em novas famílias e para tal foi utilizado o *Dips*. No total foram determinadas 6 famílias (Figura 42), das quais 3 são famílias de falhas, 2 de fraturas e 1 de foliação. Os planos médios para as famílias estão descritos na Tabela 19.

Figura 42: Famílias do setor B agrupadas no *Dips*.

Fonte: O autor.

Tabela 19: Planos médios (*dip e dip direction*) das famílias de descontinuidades do setor 1B.

FAMÍLIA	ESTRUTURA	DIP DIRECTION	DIP
Família 1b	Falha	88	48
Família 2b	Falha	196	29
Família 3b	Falha	325	33
Família 4b	Fratura	129	81
Família 5b	Fratura	110	18
Família 6b	Foliação	221	78

Fonte: o autor.

Dentre as litologias mapeadas na cava aparecem predominantemente no setor 1B o Quarto-Biotita Xisto (222 pontos), Xisto Grafitoso (102 pontos) e o Granodiorito Compactado (85 pontos). Apenas 10 estruturas aparecem no Minério-Sílico Carbonatado. Quanto à resistência das paredes a maioria das estruturas se enquadra na classificação R5 e R6, indicando que os maciços rochosos do setor 1B são muito fortes a extremamente fortes. Alguns pontos foram classificados como R2 e R3, contudo de maneira geral são rochas resistentes.

Os maciços desse setor se encontram levemente intemperizados (W2) a medianamente intemperizados (W3), aparecendo alguns pontos mais intemperizados. O espaçamento entre as descontinuidades se apresenta bastante variado, indo de 0,05 a 0,6 metros (L3 e L4).

Quanto à persistência, a maioria das descontinuidades (210) possui a extensão do traço maior que 20 metros, porém foram encontradas aquelas com tamanhos menores, da faixa de 3 a 10 metros. Esse fato indica que de maneira geral as descontinuidades do setor 1B são muito persistentes. Quanto à rugosidade, se apresentam levemente rugosas a rugosas. Possuem aberturas da ordem de 5mm e a maioria delas não possuem preenchimento. Quando possuem varia de macio a duro. A Tabela 20 mostra o resumo das características das descontinuidades presentes no setor 1B. Todos esses dados podem ser visualizados no Anexo 2.

Tabela 20: Resumo das características das discontinuidades do setor 1B.

Família	Estrutura	Orientação	Resistência	Alteração	Espaçamento	Persistência	Abertura	Rugosidade	Preenchimento
Família 1b	Falha	88/48	R5/R6	W2/W3	L3/L4	>20m	5mm	Levemente rugosa a rugosa	nenhum
Família 2b	Falha	196/29	R5/R6	W2/W3	L3/L4	>20m	5mm	Levemente rugosa a rugosa	nenhum
Família 3b	Falha	325/33	R5/R6	W2/W3	L3/L4	>20m	5mm	Levemente rugosa a rugosa	nenhum
Família 4b	Fratura	129/81	R5/R6	W2/W3	L3/L4	3m -10 m	5mm	Levemente rugosa a rugosa	nenhum
Família 5b	Fratura	110/18	R5/R6	W2/W3	L3/L4	3m -10 m	5mm	Levemente rugosa a rugosa	nenhum
Família 6b	Foliação	221/78	R5/R6	W2/W3	L3/L4	3m -10 m	5mm	Levemente rugosa a rugosa	nenhum

Fonte: o autor.

4.3.2 Definição dos parâmetros dos critérios de resistência do setor 1B

Os dados do setor 1B, coletados no mapeamento, foram usados nos cálculos dos parâmetros dos critérios de resistência conforme descrito no item 2.4 do capítulo *Referencial Teórico*, utilizando as equações indicadas neste local. Após os cálculos, os dados foram tratados estatisticamente, fazendo-se a média aritmética de cada um deles, relacionando-os com os litotipos da cava da mina. Nos itens a seguir serão mostrados e descritos os resultados dos dados para cada um dos critérios usados.

4.3.2.1 Critério de Hoek-Brown

Com os dados disponibilizados, foi possível calcular somente os parâmetros s e a . Para o fator de perturbação D , realizaram-se os cálculos considerando $D=0$, ou seja, nenhuma perturbação nos maciços e com $D=1$ (muita perturbação no maciço). Notou-se assim, que o valor do parâmetro s reduz significativamente quando $D=1$, como era de se esperar (Tabela 21). O parâmetro a ficou em torno de 0,5.

Tabela 21: Resultados para os parâmetros s e a de Hoek-Brown.

LITOTIPO	Hoek Brown			
	D=0		D=1	
	s	a	s	a
MSC	0,1263	0,5006	0,0466	0,5006
IAF	0,1920	0,5005	0,1004	0,5005
IGD	0,0804	0,5012	0,0265	0,5012
IGD_A	0,0068	0,5043	0,0006	0,5043
IGD_A/X	0,0112	0,5029	0,0012	0,5029
XGT	0,0178	0,5026	0,0027	0,5026
XGT/IGD	0,0546	0,5013	0,0150	0,5013
XQB	0,0640	0,5018	0,0226	0,5018
XQB/IGD	0,0575	0,5011	0,0147	0,5011
XQB/XGT	0,0414	0,5021	0,0106	0,5021
XQB_A	0,0126	0,5042	0,0019	0,5042
XQB_A/XGT	0,0156	0,5025	0,0020	0,5025
XQB_A/XQB	0,0456	0,5022	0,0144	0,5022

Fonte: o autor.

4.3.2.2 Critério de Barton-Bandis

A Tabela 21 mostra os resultados dos cálculos para os parâmetros do critério de Barton-Bandis. Nota-se que para o JRC foi determinado uma linha de amostragem de comprimento inicial de 10 cm (JRC_{10}), que é uma escala de laboratório e para uma escala de campo (JRC_n), onde n variou de 1 a 20 metros. O JRC_n resultou em valores menores que o JRC_{10} , conforme o esperado. Além desses dois parâmetros foram calculados o JCS e o ângulo de atrito residual. Notar que para o MSC o ângulo $PHIr_1$ é muito para os padrões usuais e logo deve ser considerado como 45° (Tabela 22).

Tabela 22: Resultados para os parâmetros de Barton-Bandis.

LITOTIPO	Barton-Bandis				
	JCS	JRC_{10}	JRC_n	$PHIr_1$	$PHIr_2$
MSC	69,95	9,70	8,92	63,00	36,00
IAF	81,95	6,75	6,13	35,48	30,00
IGD	34,51	12,31	11,48	46,26	28,44
IGD_A	4,86	11,00	10,06	39,86	27,73
IGD_A/X	0,52	11,00	9,89	33,69	25,00
XGT	0,63	12,50	11,73	42,17	26,25
XGT/IGD	15,25	12,20	11,35	45,00	28,00
XQB	26,98	10,18	9,31	46,49	30,53
XQB/IGD	20,49	11,43	10,53	39,59	27,29
XQB/XGT	13,72	12,35	11,54	41,22	26,16
XQB_A	1,99	10,05	9,11	43,16	30,00
XQB_A/XGT	0,61	13,00	12,21	41,23	25,00
XQB_A/XQB	9,86	12,714	12,02	43,27	27,00

Fonte: o autor.

4.3.3 Análise cinemática do setor 1B

A análise cinemática para o setor 1B foi realizada considerando o talude global e o talude de bancada, que possuem orientações predominantes indicadas na Tabela 23. Esses dados foram fornecidos pelo mapeamento realizado. As análises realizadas foram para ruptura em cunha, ruptura planar, tombamento flexural e de blocos. O ângulo de atrito considerado foi o de 45° , predominância dos ângulos de atrito das estruturas encontradas na área. A seguir serão apresentados os resultados das análises cinemáticas realizadas.

Tabela 23: Dados dos taludes de bancada, global e ângulo de atrito.

TALUDE		
	DIREÇÃO DE MERGULHO	MERGULHO
GLOBAL	216	39
BANCADA	216	68
ÂNGULO DE ATRITO		
	ESTRUTURA	ÂNGULO
	Falha	45,26
	Contato	45
	Fratura	56,31
	Foliação	44,91
	Todas	44,91

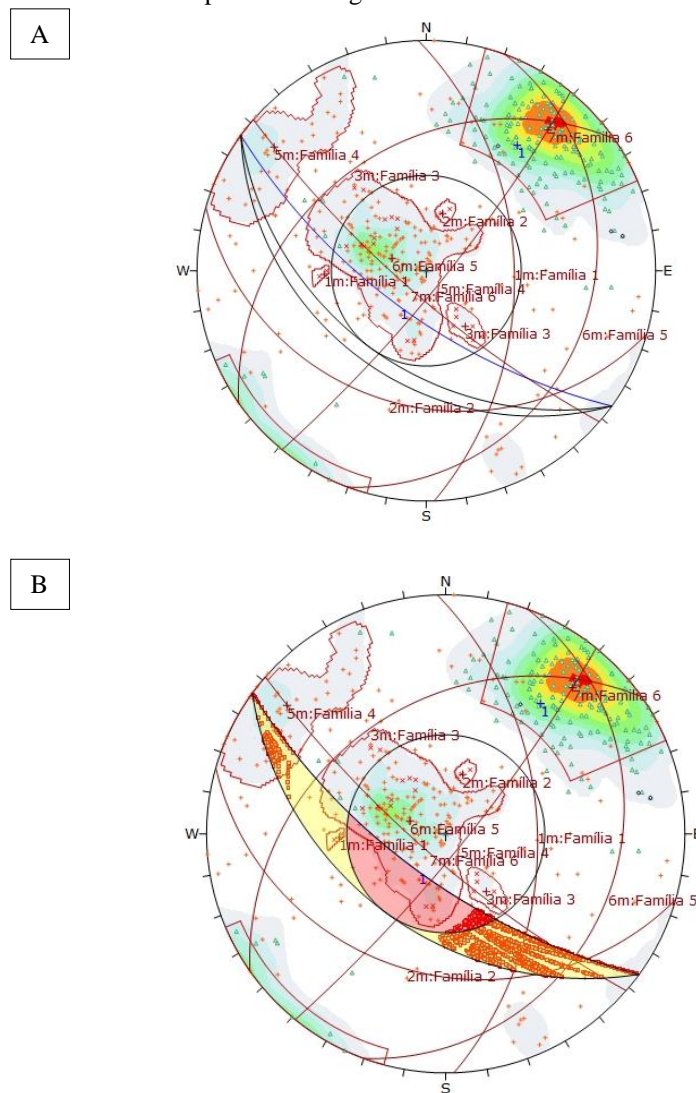
Fonte: o autor.

4.3.3.1 Análise cinemática em cunha

A análise cinemática em cunha se baseia na interseção de planos das descontinuidades. Sendo assim, as análises desse trabalho foram realizadas considerando a interseção de todos os planos e a interseção entre os planos médios de cada família do setor 1B, anteriormente definidas.

A Figura 43 A e B mostra a análise cinemática para todos os planos tanto para o talude global (A) quanto para o de bancada (B). Nota-se que para o talude global, dentre as 125.212 interseções, não ocorreu nenhuma interseção crítica com potencial de ruptura em cunha. Já para o talude de bancada, de todas as interseções, 8.552 delas são críticas, o que perfaz 6,83% de probabilidade de ruptura por cunha nos taludes de bancada (região vermelha).

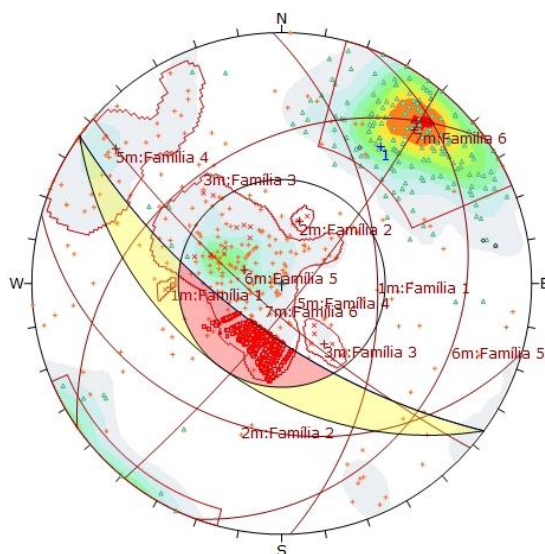
Figura 43: Análise cinemática do *Dips* com a interseção de todos planos mapeados. Em A, tem-se a análise para o talude global e em B o talude de bancada.



Fonte: O autor.

Quando se analisa as interseções entre os planos médios de cada família, percebe-se que para o talude de bancada, as probabilidades de ruptura por cunha são relativamente baixas, podendo ocorrer em alguns casos. A Figura 44 mostra o exemplo da análise para o talude de bancada com a interseção entre as famílias 4b e 6b. Esse foi o caso em que ocorreu a maior probabilidade de ruptura, perfazendo um total de 16,14% de chance de se formar uma cunha. A Tabela 24 mostra as combinações entre as famílias que apresentaram chances de ocorrência de falha e a suas respectivas probabilidades.

Figura 44: Análise cinemática do *Dips* com a interseção de planos médios das famílias 4b e 6b.



Fonte: O autor.

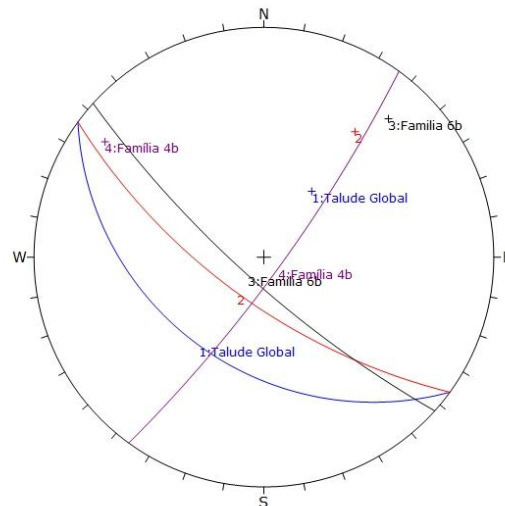
Tabela 24: Resultado da análise cinemática para a ruptura em cunha da combinação das famílias com possibilidade ruptura.

TALUDE DE BANCADA			
Família	Interseções	Crítica	Probabilidade
1X6	346	22	6,36%
2X6	519	18	3,47%
3X6	1038	97760	5,78%
4X6	6055	977	16,14%

Fonte: o autor.

Com base nos dados supracitados percebe-se que a família 6b é a que mais aparece nas combinações entre as famílias com probabilidade de ruptura em cunha e que sua interação com a família 4b é a que aponta a maior probabilidade (16,14%) (Figura 45). Contudo, ainda assim, essa probabilidade de ruptura pode ser considerada baixa. As combinações entre as outras famílias não evidenciou nenhuma probabilidade de ruptura por cunha.

Figura 45: Interseção das famílias 4b e 6b e relação com os taludes de bancada e global.

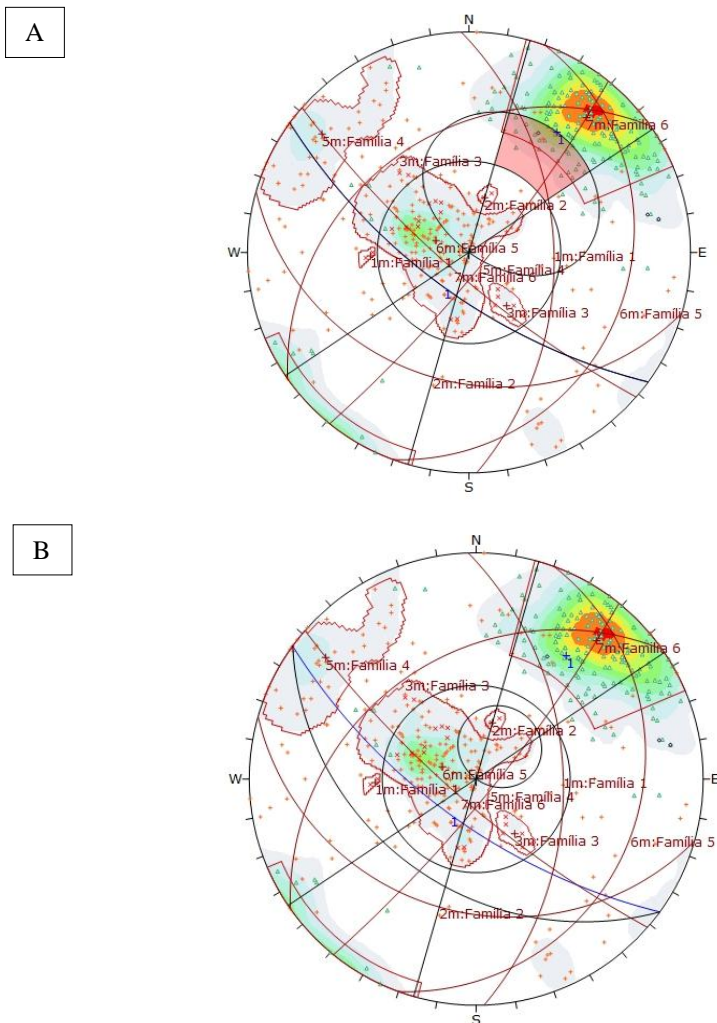


Fonte: o autor.

4.3.3.2 Análise cinemática planar

Após a análise cinemática planar concluída, nota-se que para os taludes de bancada é possível à ruptura por esse mecanismo em aproximadamente 23 descontinuidades das 501, considerando a análise entre todas as descontinuidades mapeadas, o que perfaz em torno de 4,59%. A possibilidade desse fenômeno somente pode ocorrer nas descontinuidades da família 6b (Figura 46 - A), cuja orientação média é 221/78 e com a probabilidade de 12,14%. Já para o talude global não é possível a ocorrência de ruptura do tipo planar (Figura 46 - B).

Figura 46: Em A tem-se a análise cinemática para ruptura planar nos taludes de bancada. Já em B, tem-se a análise cinemática para ruptura planar no talude global.



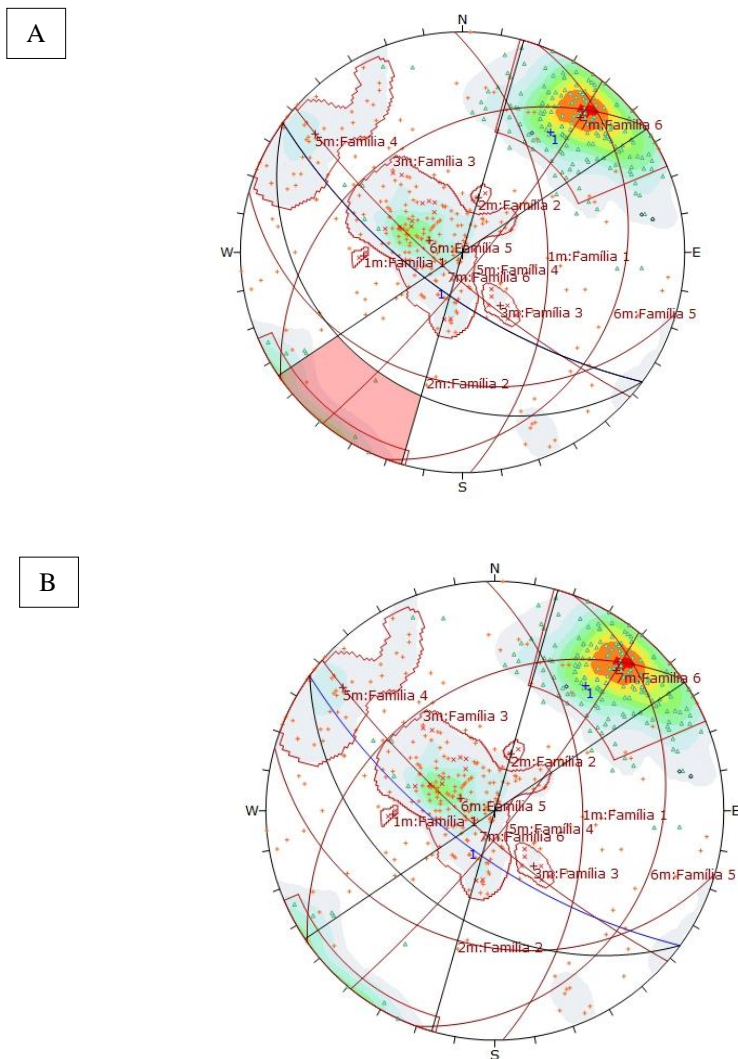
Fonte: O autor.

4.3.3.3 Análise cinemática por tombamento flexural

Para o talude de bancada é possível observar que ocorre uma pequena probabilidade de ruptura por tombamento flexural. Quando se consideram todas as discontinuidades a chance do mecanismo de ruptura ser o flexural é de 1,2% e para as famílias percebe-se novamente que na família 6b (orientação média 221/78) ocorre a probabilidade de 2,31%, contemplando somente 4 discontinuidades (Figura 47 - A). Essa percentagem de ruptura é considerada muito baixa. Nas demais famílias não há probabilidade de ruptura por esse mecanismo.

Assim como na análise da ruptura planar, para a ruptura por tombamento flexural nota-se que quando se considera o talude global não há probabilidade de ruptura por esse mecanismo (Figura 47 -B).

Figura 47: Em A tem-se a análise cinemática para tombamento flexural nos taludes de bancada. Já em B, tem-se a análise cinemática para tombamento flexural no talude global.

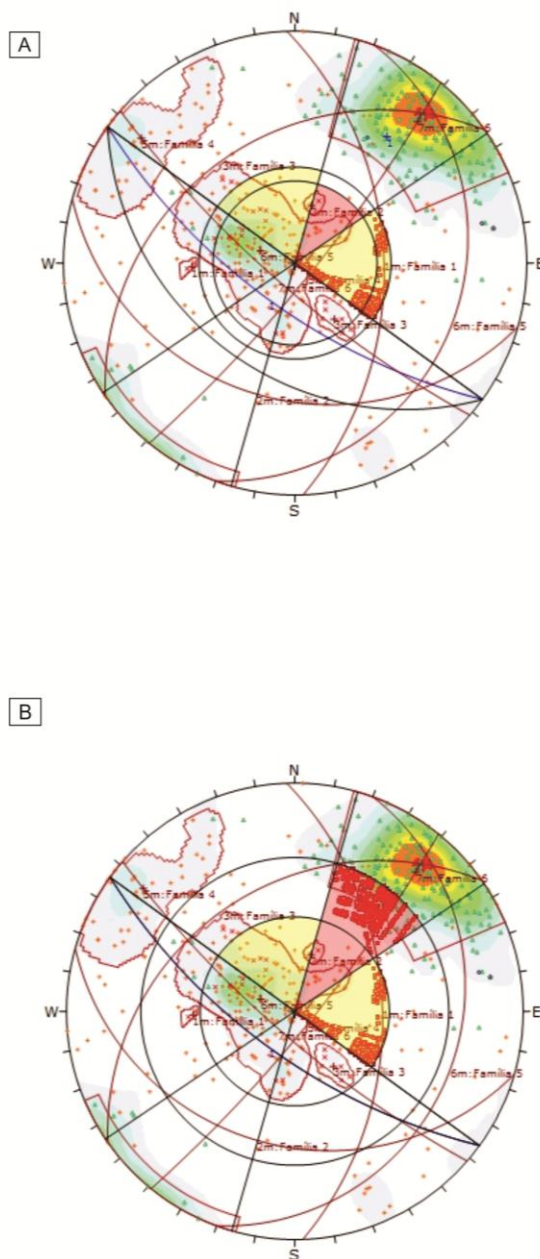


Fonte: O autor.

4.3.3.4 Análise cinemática por tombamento de blocos

A Figura 48- A mostra a análise cinemática para tombamento de blocos para o talude global considerando todas as famílias. Das 45.828 intersecções, somente 10 são críticas, totalizando uma probabilidade de 0,2%. Já para o talude de bancada de todas as intersecções possíveis, a probabilidade de ruptura por esse mecanismo é de 1,68% (Figura 48-B). Em ambos os casos é considerada uma probabilidade baixa.

Figura 48: Em A tem-se a análise cinemática para tombamento de blocos no talude global. Já em B, tem-se a análise cinemática para tombamento de blocos nos taludes de bancada.



Fonte: o autor.

Analisou-se, nesse caso, a probabilidade de ruptura considerando a formação de blocos entre duas famílias. Esse procedimento foi realizado tanto para o talude de bancada quanto para talude global. Para esse último não ocorreu probabilidade de ruptura para nenhuma combinação. Já para o talude de bancada as famílias 1b e 4b apresentaram a maior probabilidade na ordem de 64%. Também foi expressiva a probabilidade da combinação entre as famílias 1b e 3b. Os resultados dessas combinações podem ser vistos na Tabela 25.

Tabela 25: Combinação entre as famílias do setor 1B e probabilidade de ruptura por tombamento de blocos.

TALUDE DE BANCADA			
Família	Interseções	Crítica	Probabilidade
1X2	6	0	0,00%
1X3	12	5	41,67%
1X4	70	45	64,29%
1X5	342	40	11,70%
1X6	345	0	0,00%
2X3	18	0	0,00%
2X4	105	0	0,00%
2X5	513	0	0,00%
2X6	519	0	0,00%
3X4	210	10	4,76%
3X5	1026	20	1,95%
3X6	1038	0	0,00%
4X5	5985	641	10,71%
4X6	605	10	0,17%
5X6	29583	0	0,00%

Fonte: o autor.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

De maneira geral, a maioria das descontinuidades mapeadas na cava se encontra inserida no Quartzo Biotita Xisto (XQB), no Minério Sílico Carbonatado (MSC) e no Granodiorito Compactado (IGD). Contudo, no setor 1B somente 10 descontinuidades aparecem no MSC. A resistência à compressão das paredes das descontinuidades predominante é muito forte (R5) e o grau de alteração dominante é levemente intemperizado (W2). Em alguns casos o maciço se apresenta são (W1). A parede das descontinuidades são rugosas a levemente rugosas, com abertura na faixa 5 mm e sem preenchimento. O espaçamento varia de L1 a L3.

As características das descontinuidades do setor 1B se diferem pouco das da classificação geral, o que era de se esperar, já que se trata de dados coletados no mesmo local. Porém, para o espaçamento e para a litologia foram encontradas diferenças significativas, que estão associadas à escala da análise. Deve-se dar atenção especial para o espaçamento, visto que é uma variável de grande relevância na estabilidade de taludes em maciços rochosos e que no setor 1B com valores pequenos (entre L3 e L4).

O algoritmo *Heurística* sugerido por Klen (2015) foi bastante efetivo para determinar as famílias das descontinuidades quando o número de dados é muito grande, como é o caso dessa pesquisa (classificação geral). Porém, o *Dips* ainda se mostrou muito satisfatório quando o número de dados for menor como no caso da análise realizada nos dados do setor 1B.

A família 8 da classificação geral apresentou-se como pouco persistente, o que gera certa estranheza por se tratar de contatos litológicos. Isso pode ter ocorrido, pois foram poucos pontos mapeados (somente 23 para uma área tão grande).

Quanto à análise estatística, não foi possível com base nos testes realizados, encontrar com absoluta certeza qual é o tipo de distribuição dos dados de espaçamentos, pois entre os três testes realizados para as cinco distribuições feitas todos eles

apresentaram o *p-value* menor que 5%, o que indica que a distribuição não se ajusta aos dados. Nessa pesquisa as distribuições que apresentaram o *p-value* mais próximo do nível de significância fixado (5%) foram às distribuições de Weibull e Gama.

As análises cinemáticas realizadas mostraram que para o mecanismo de ruptura planar e tombamento flexural, tanto para as bancadas quanto para o talude global, as probabilidades de ruptura são muito baixas ou simplesmente não tem chance de ocorrer. Já para a análise em cunha e tombamento de blocos, nota-se que a combinação de algumas famílias geram probabilidades de ruptura que variam de média a alta.

5.2 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para o caso dos contatos litológicos, que sejam coletados mais pontos e que a geologia estrutural da área seja mais detalhada, como por exemplo, a presença de dobras e a continuidade desses contatos litológicos. Isso pode auxiliar na análise de estabilidade dos taludes da cava.

Recomenda-se determinar os outros parâmetros dos critérios de resistência do maciço (Hoek-Brown e Barton-Brandis) para que as rochas da cava fiquem mais bem caracterizadas e seu comportamento mecânico seja melhor compreendido.

É aconselhável realizar os mesmos procedimentos feitos para o setor 1B para os outros setores da cava para entender o comportamento individualizado dos mesmos. Ainda, pode-se realizar a análise do fator de segurança para as possíveis rupturas do setor 1B, utilizando softwares específicos como o Swedge (Rocscience).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIN, F. F., MARSHACK, S. (1998). **Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero.** Precambrian Research. 90. 29-58 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1995). **Rochas e Solos: NBR 6502.** Rio de Janeiro. 18p.

AZEVEDO, F. S. (2005). **Estudo experimental da influência de tensões na permeabilidade de rochas produtoras de petróleo.** Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. PUC RIO, Departamento de Engenharia Civil. 134p.

BAARS, F. J.; ROSIÈRE, C. A. (1997). **Geological map of the Quadrilátero Ferrífero.** In Baars, F. J. The São Francisco Craton.

BARTON, N. (1974). **Review of a new shear-strength criterion for rock joints.** Engineering Geology, 7(4):287 -332.

BARTON, N., MCHOUBEYV. (1977). **The shear strength of rock joints in theory and practice.** Rock mechanics, 10p.1-54.

BARTON, N. (1982). **Shear Strength Investigations for Surface Mining.** In Stability in Surface Mining, Proceedings of 3rd International Conference (ed. CO Brawner), Vancouver, British Columbia, pp 171-196. Society of Mining Engineers. AIME, New York.

BIENIAWSKI, Z. T. (1979). **The geomechanics classification in rock engineering applications.** In: International Congress Rock Mechanical. Montreaux: ISRM. V.2.

BIENIAWSKI, Z. T. (1989). **Engineering rock mass classification.** New York: John Wiley.

BRUZZI, A. F. G. (2019). **Estudo da distribuição estatística das distâncias entre descontinuidades em testemunhos de sondagem de maciços rochosos**. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. 153p.

CELLA, P. R. C., MAGALHÃES, F. S. (1998). **Estrutura dos Maciços Rochosos**. In: OLIVEIRA E BRITO (1998). Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE. p. 39-55.

CHRISTOFOLLETTI, C. (2014). **Correlação entre as classificações geomecânicas RMR e Q e sua relevância geológica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 310p.

EMPRESA. (2014). **Projeto da mina**. Relatório Técnico. 153 p.

ENDO, I. (1997). **Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociencias. Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2 volumes, 243p.

FOSSEN, H. (2012). **Geologia Estrutural**. Tradução: Fábio R. D. Andrade. Oficina de Textos. São Paulo.

HOEK, E. (1994). **Strength of rock and rock masses**. ISRM New Journal 2(2), p. 4-16.

HOEK, E.; BROWN, E.T. (1980). **Underground Excavation in rock**. London: IMM.527 p.

HOEK, E.; BROWN, E.T. (1997). **Practical Estimated of Rock Mass Strength**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. p. 1165-1186.

HOEK, E.; BROWN, E.T. (2018). **The Hoek-Brown failure criterion and GSI**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical.

ISRM (1981). **Rock Characterization Testing and Monitoring**. E. T. Brown, 211p.

ISRM (2007). **Suggested Method for Point Load Strength**. Int. J. Rock Mechanics Min. abstr., 325, 53-59.

KLEN, A. M. (2015). **Algoritmo para agrupamento de descontinuidades em famílias baseado no método *Fuzzy k-means***. Tese de Doutorado. NUGEO. Universidade Federal de Ouro Preto. 159p.

MARINOS, V., MARINOS, P., HOEK, E. (2005). **The geological Strength Index: Applications and Limitations**. Bull Eng Geol Environ. 64: 55-65.

MELLO, M. P. ; PETERNELLI, L. A. (2013). **Conhecendo o R: uma visão mais que Estatística**. Editora UFV.

MOREIRA, S.S. (2016). **Levantamentos Geométricos Azimutais em Modelos Reduzidos para Caracterização de Maciços Rochosos**. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. 119p.

OJIMA, L. M., JÚNIOR, E. S. (1998). **Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. Geologia de Engenharia. ABGE. São Paulo. 211-226 p.

OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (1998). **Geologia de Engenharia**. ABGE. São Paulo.

ROCSCIENCE (2013). **Dips Versão 6.008. Software**. Toronto, Canadá

SANTOS, T. B. (2015). **Aplicabilidade Das Classificações Geomecânicas E Retroanálises Para Estimação Das Propriedades Dos Maciços Rochosos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.

SILVA, M. A. (2018). **Definição das famílias de descontinuidades com base em análise de agrupamentos. Estudo de caso: Morro da Mina**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia de Minas. 53 p.

TAPAHUASCO, G. M. C. (2017). **Comportamento dos Parâmetros de Rugosidade em Descontinuidades Rochosas do Sudeste do Quadrilátero Ferrífero**. Dissertação de Mestrado. Nugeo. Universidade Federal de Ouro Preto.

WYLLIE, D. C., MAH, C. W. (2004). **Rock Slope Engineering: Civil and Mining**. 4º edição. Spon Press. Londres. 456 p.

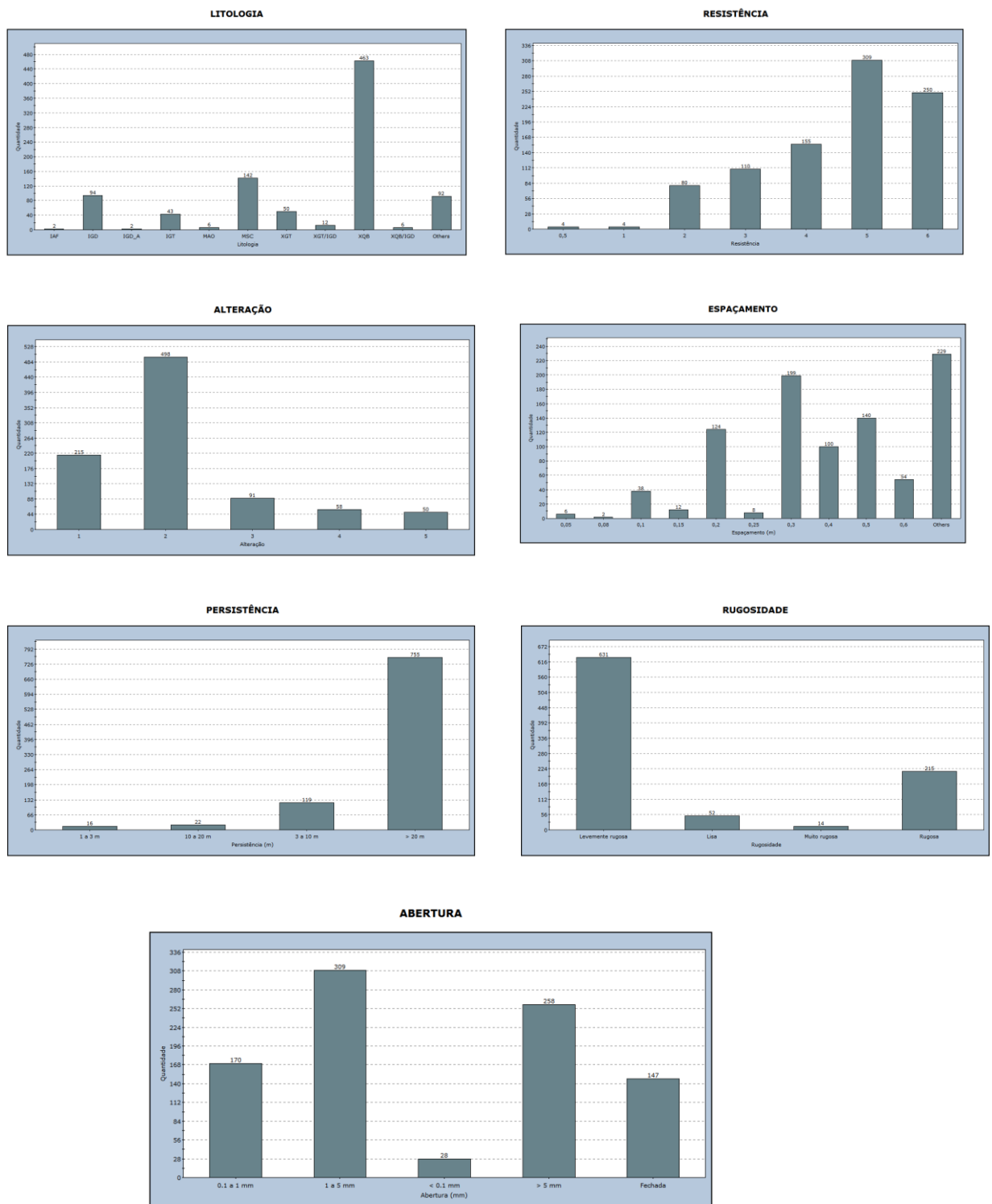
https://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_4_GE.pdf.(2019).

https://pt.wikipedia.org/wiki/Distribui%C3%A7%C3%A3o_normal(2019).

ANEXOS

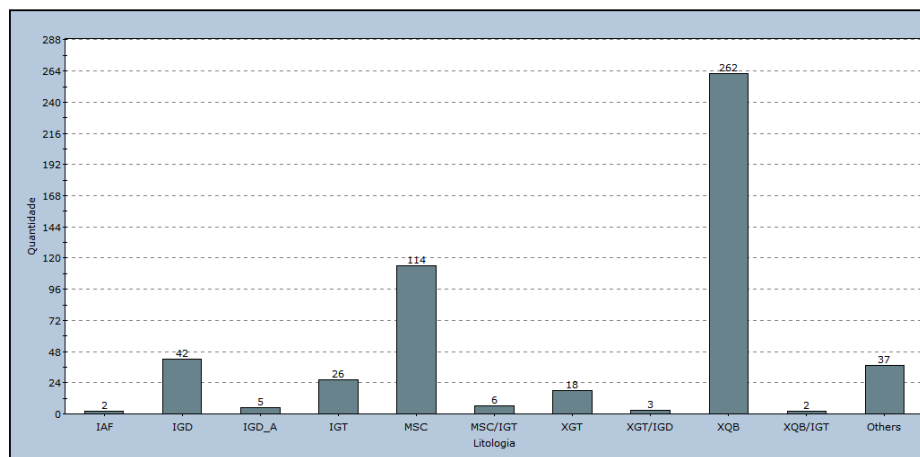
ANEXO 1: Histogramas das famílias de todos os dados.

Família 1

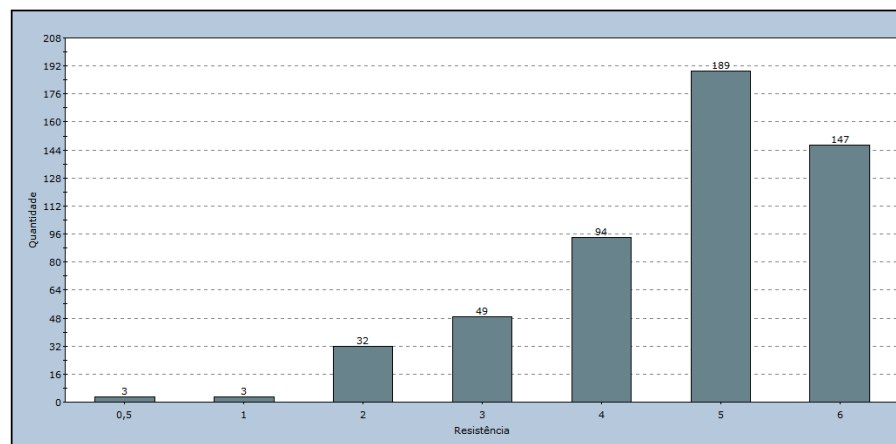


Família 2

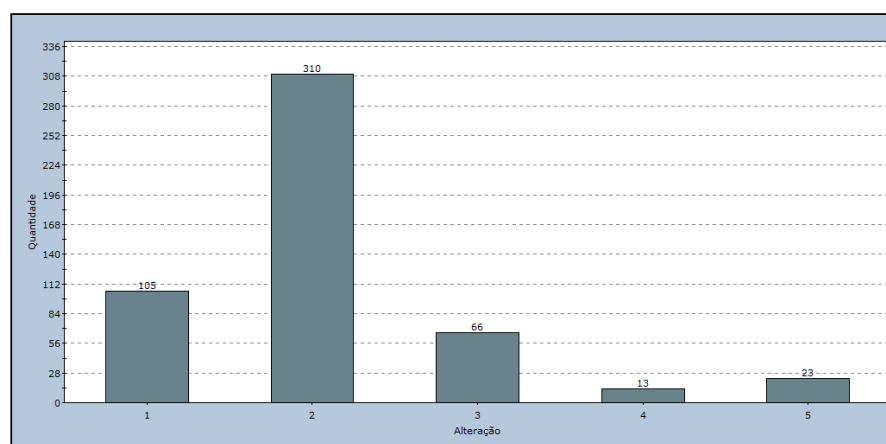
LITOLOGIA

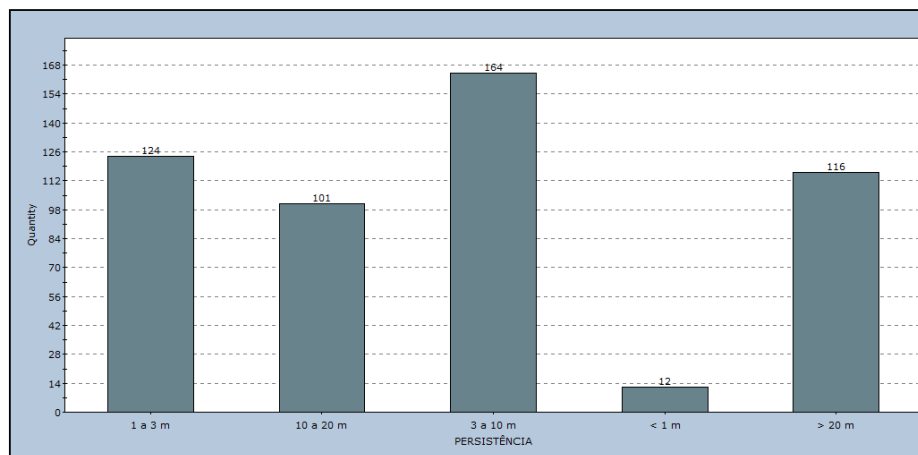
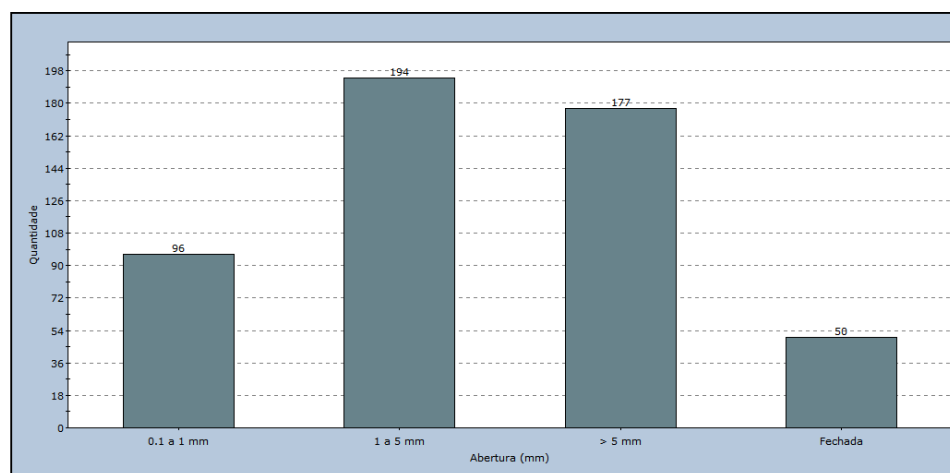
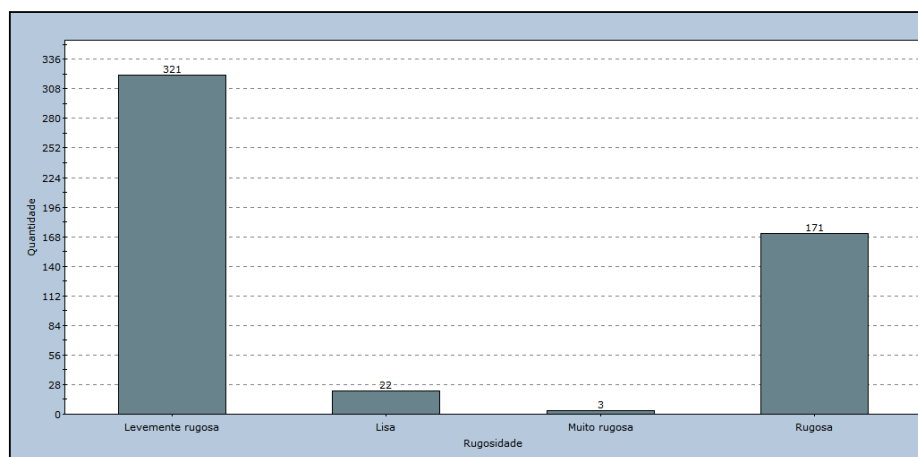


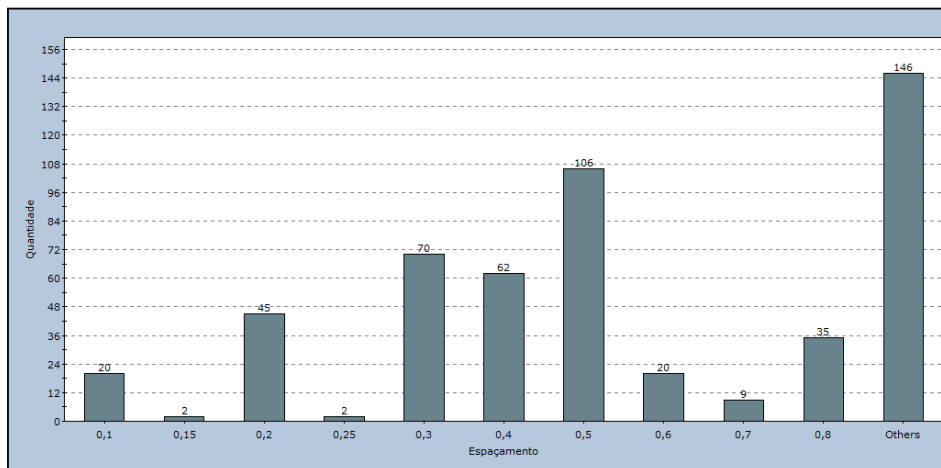
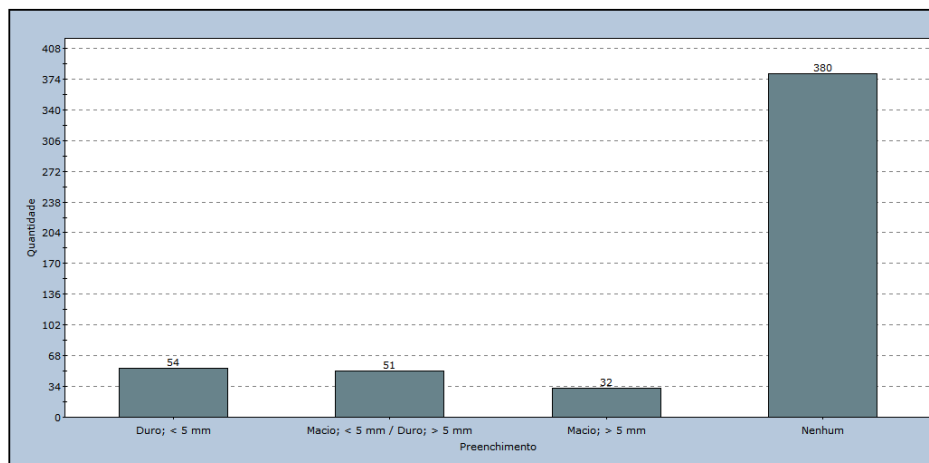
RESISTÊNCIA



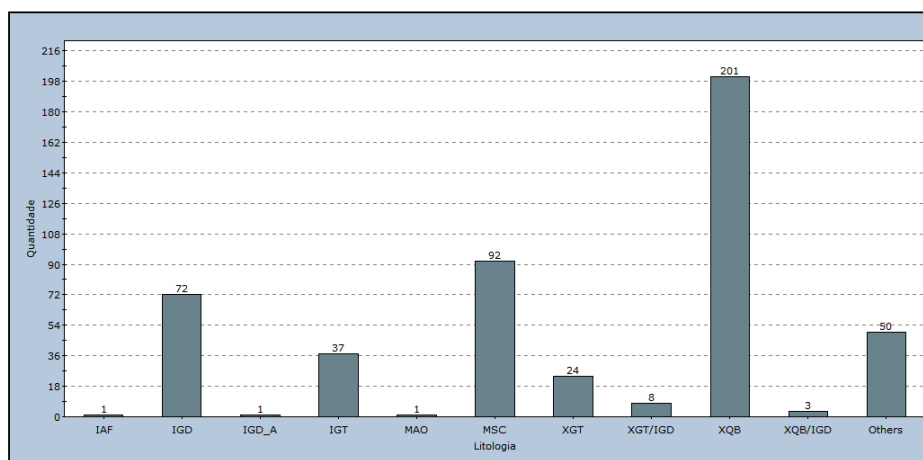
ALTERAÇÃO

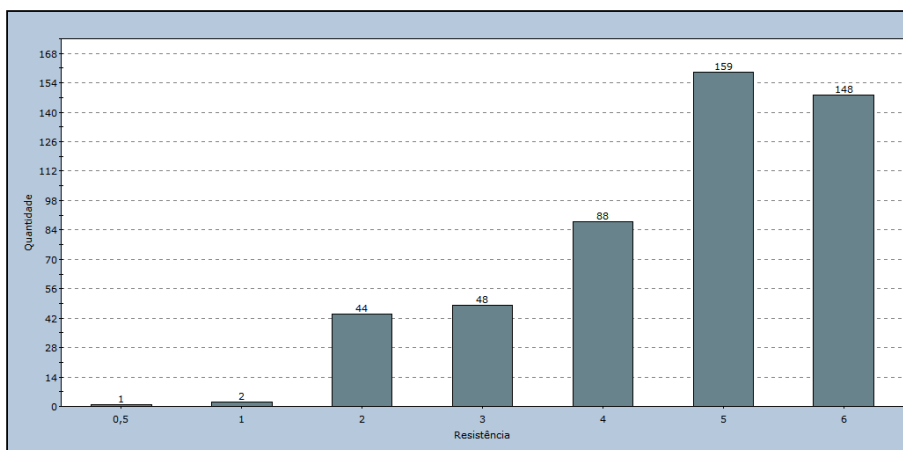
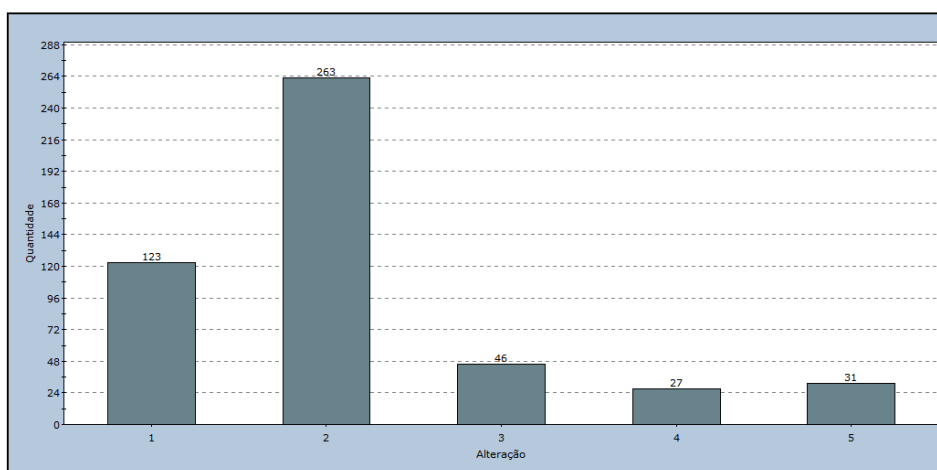
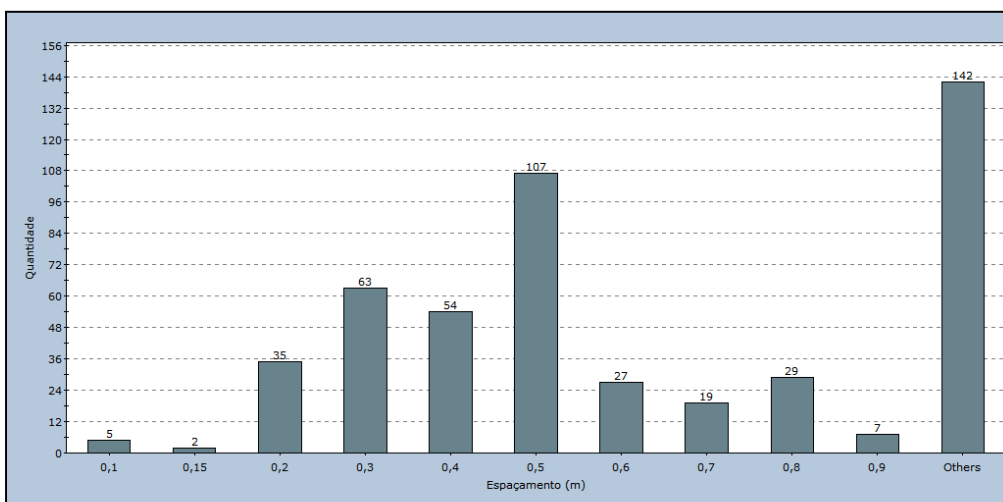


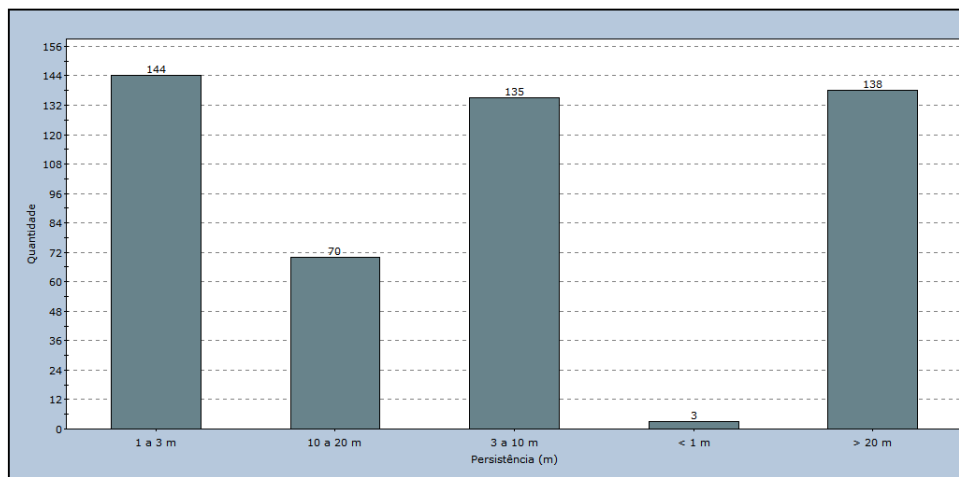
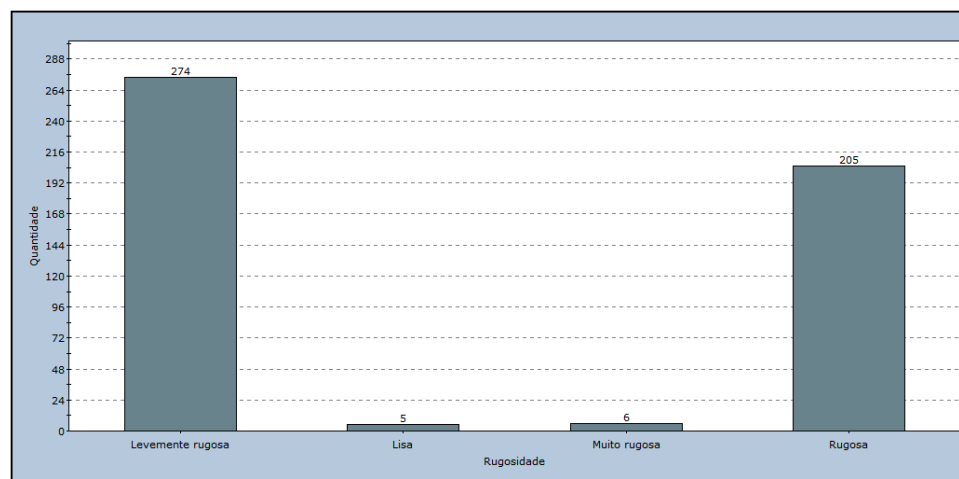
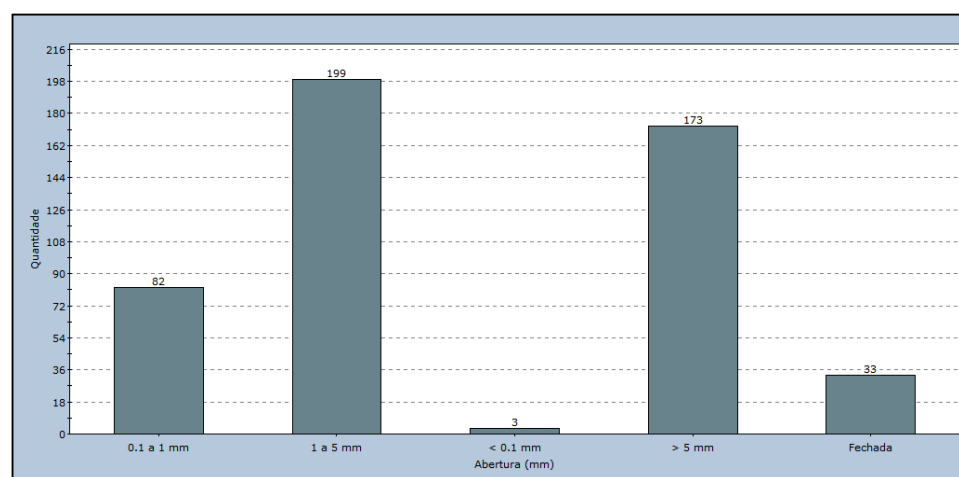
Qualitative Chart of **PERSISTÊNCIA****ABERTURA****RUGOSIDADE**

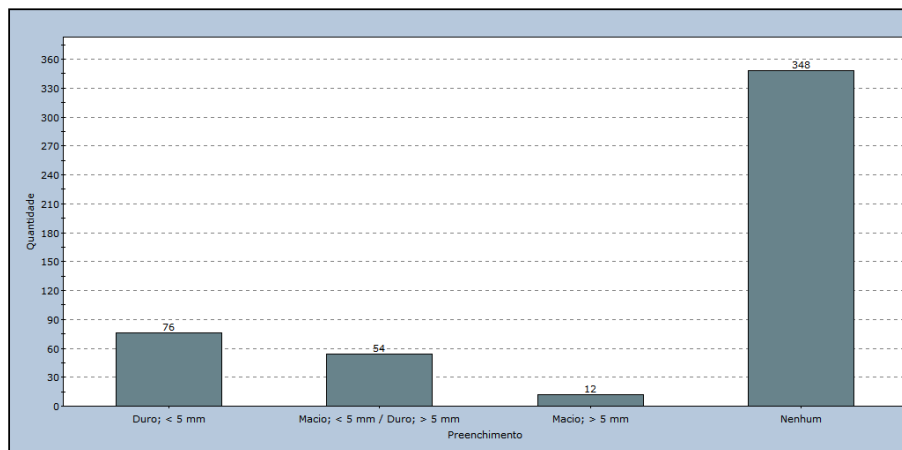
ESPAÇAMENTO**PREENCHIMENTO**

Família 3

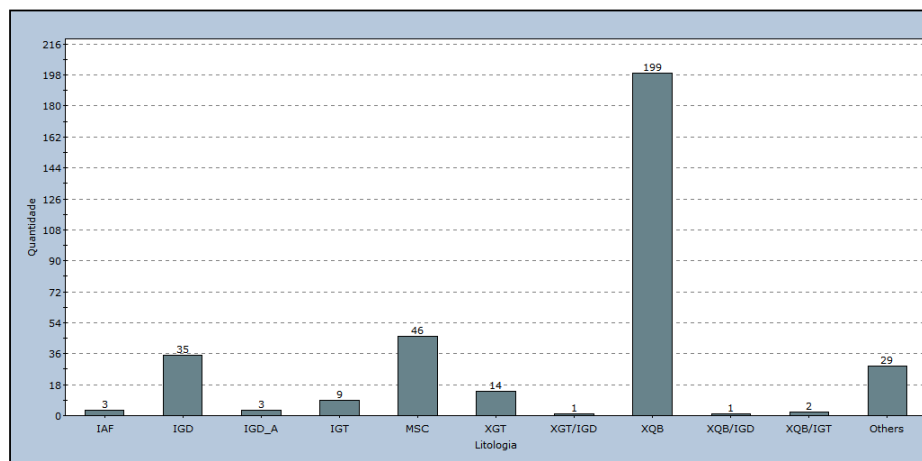
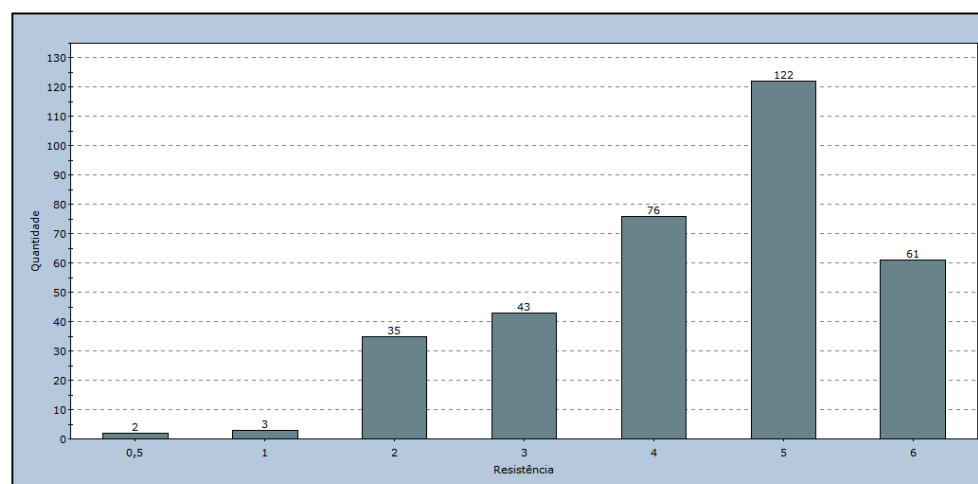
LITOLOGIA

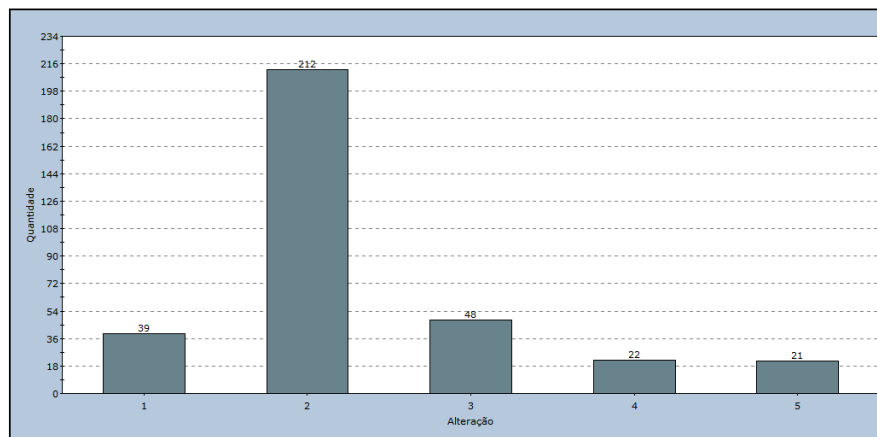
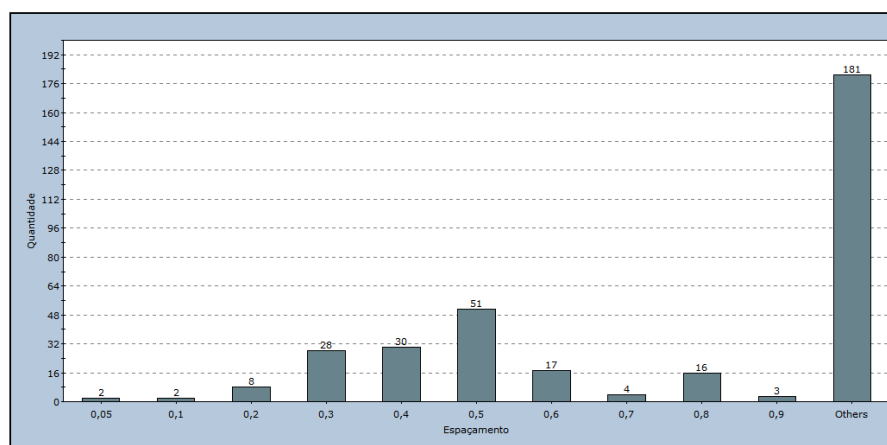
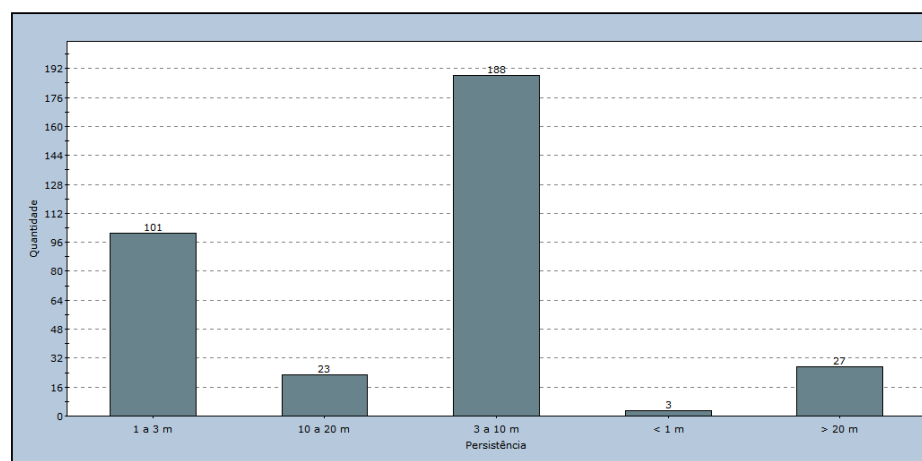
RESISTÊNCIA**ALTERAÇÃO****ESPAÇAMENTO**

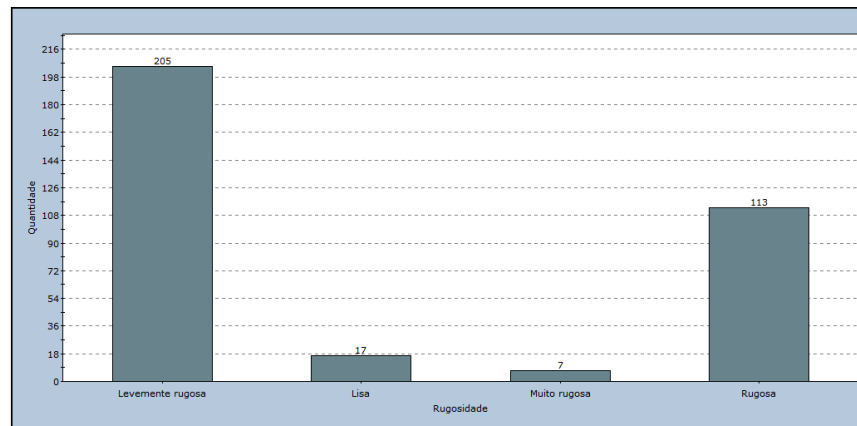
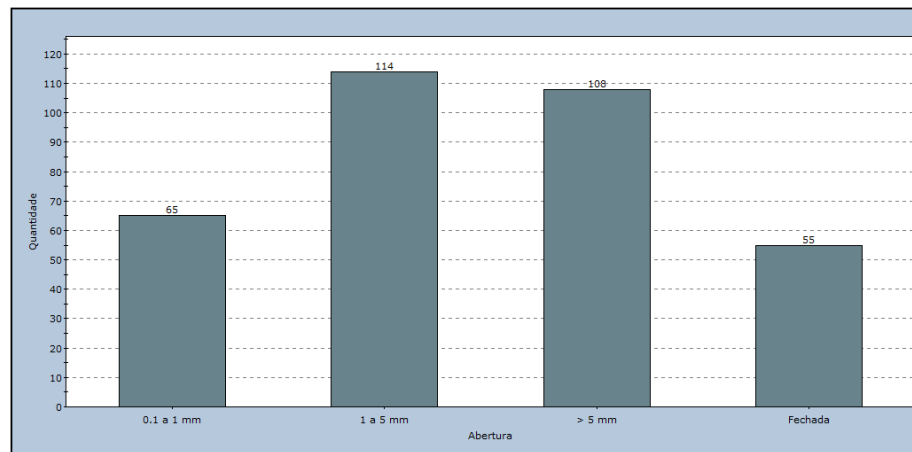
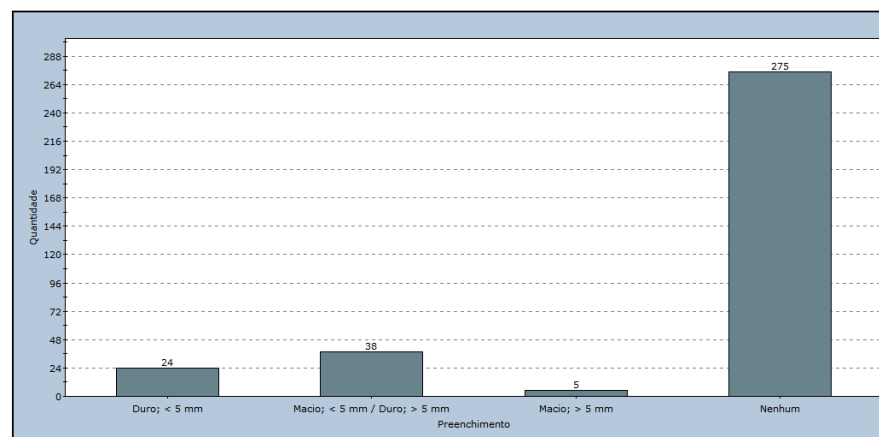
PERSISTÊNCIA**RUGOSIDADE****ABERTURA**

PREENCHIMENTO

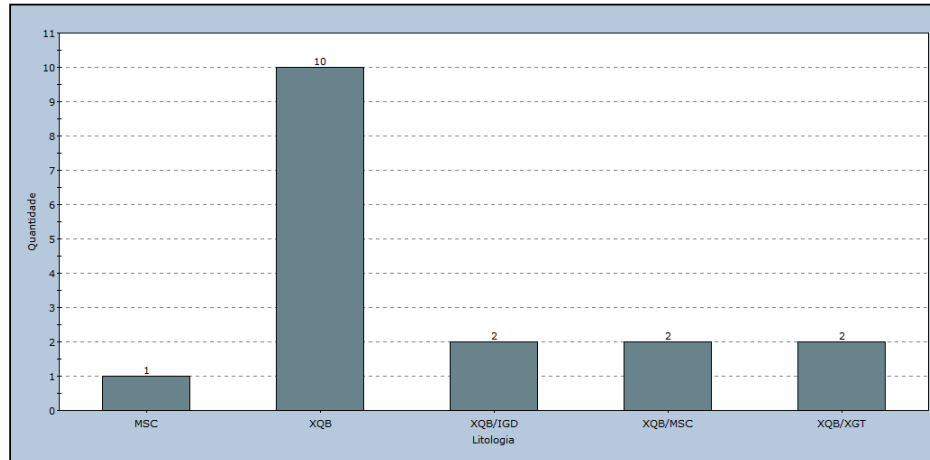
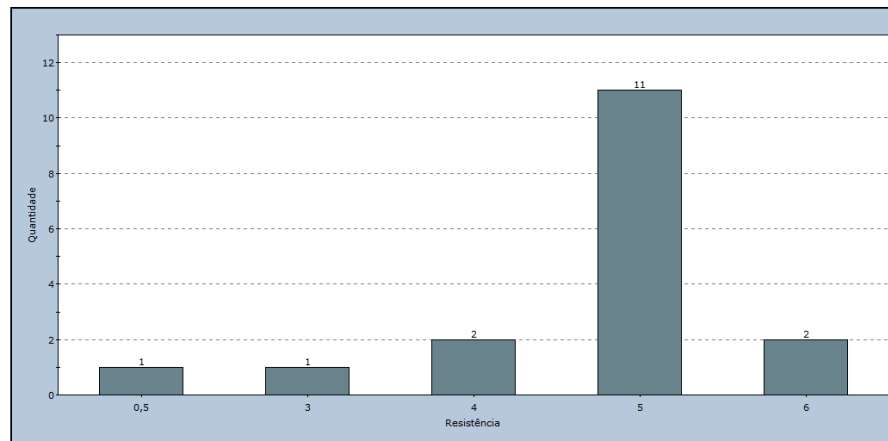
Família 4

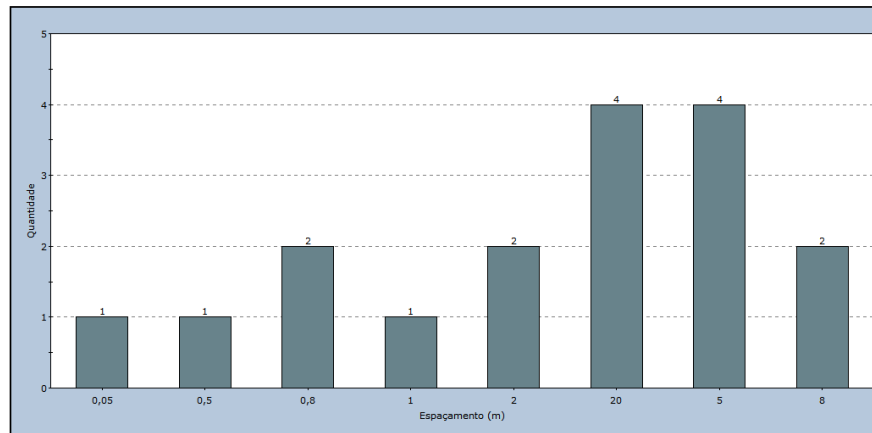
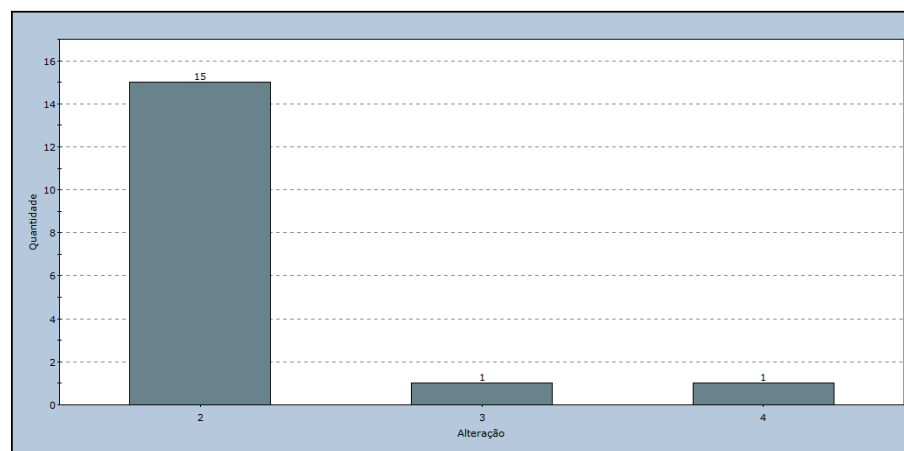
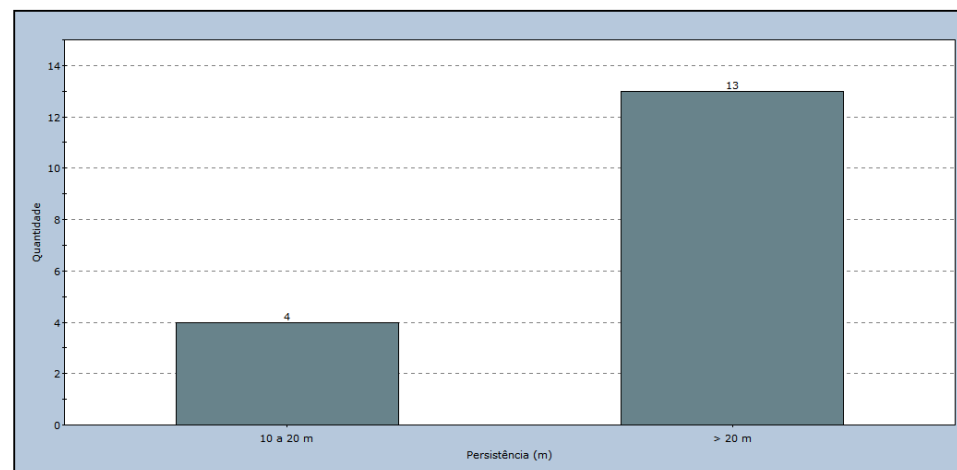
LITOLOGIA**RESISTÊNCIA**

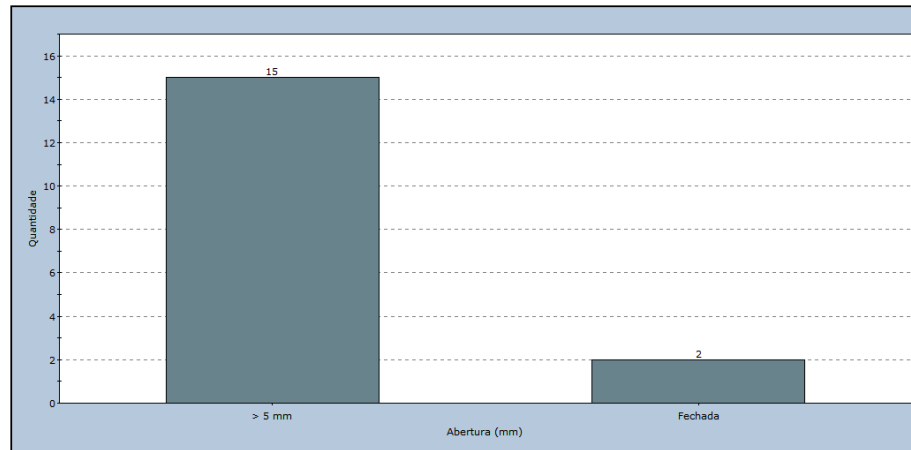
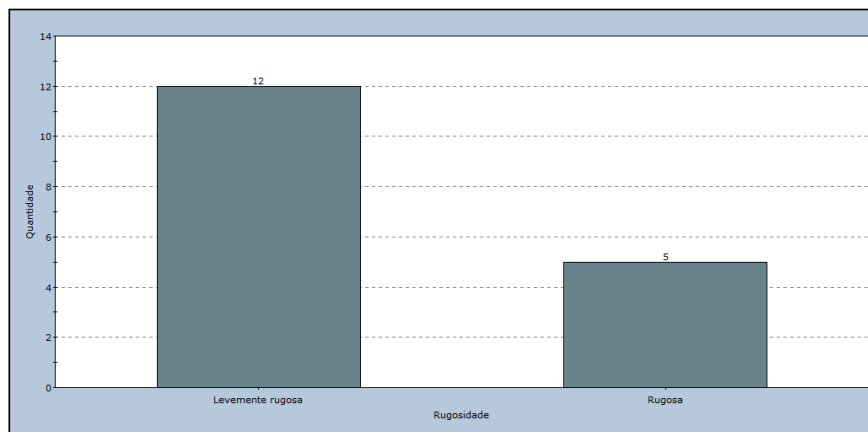
ALTERAÇÃO**ESPAÇAMENTO****PERSISTÊNCIA**

RUGOSIDADE**ABERTURA****PREENCHIMENTO**

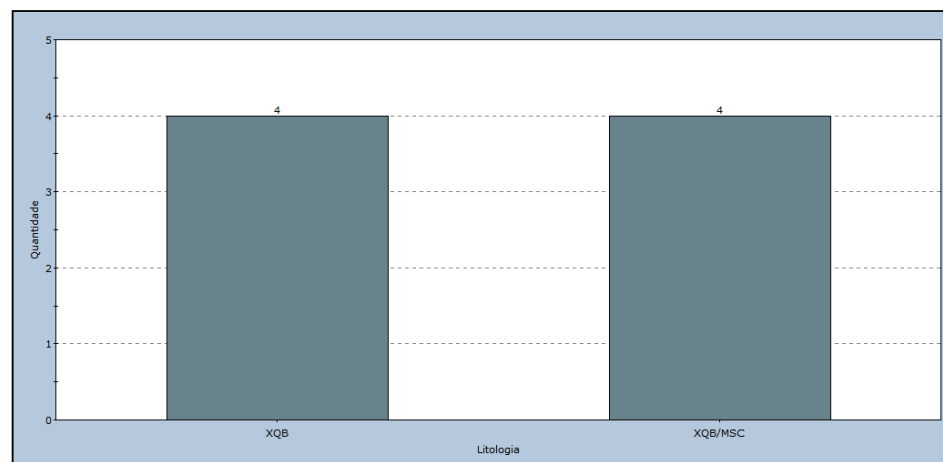
Família 5

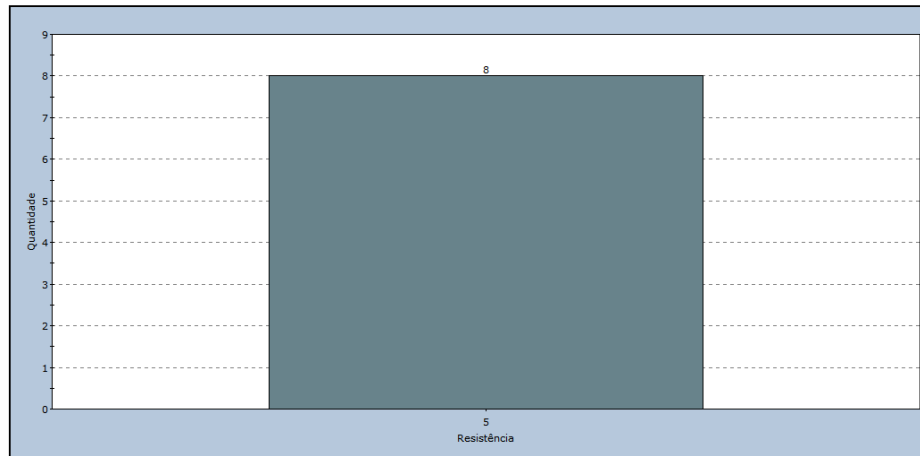
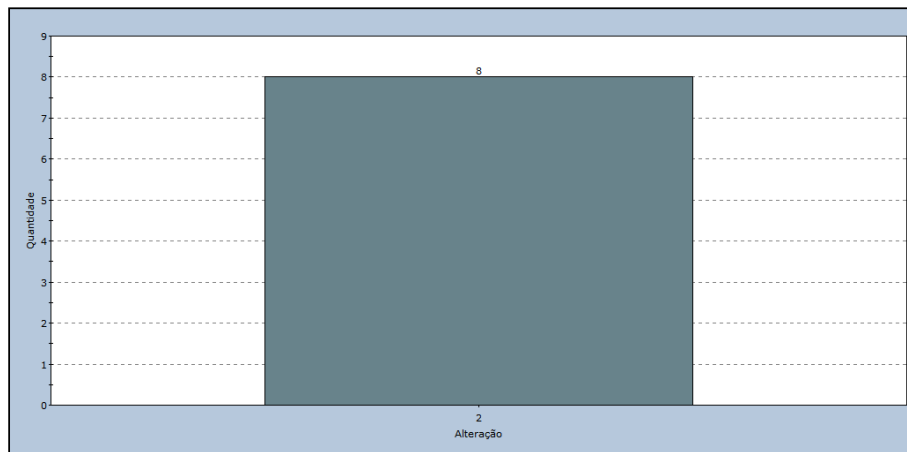
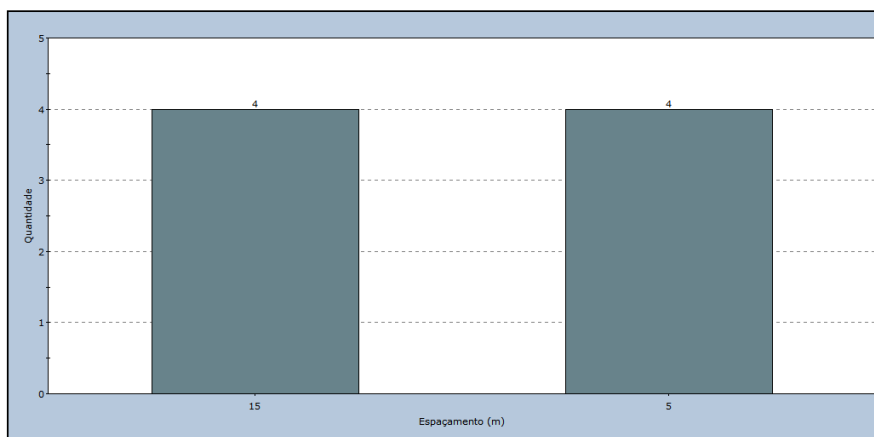
LITOLOGIA**RESISTÊNCIA**

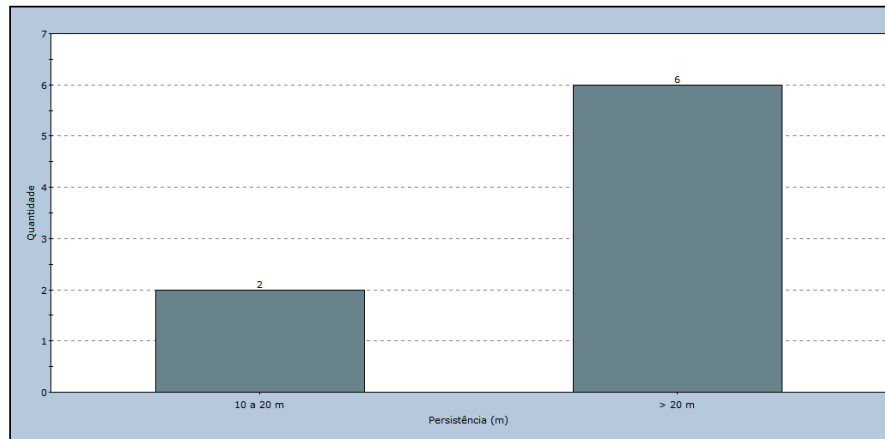
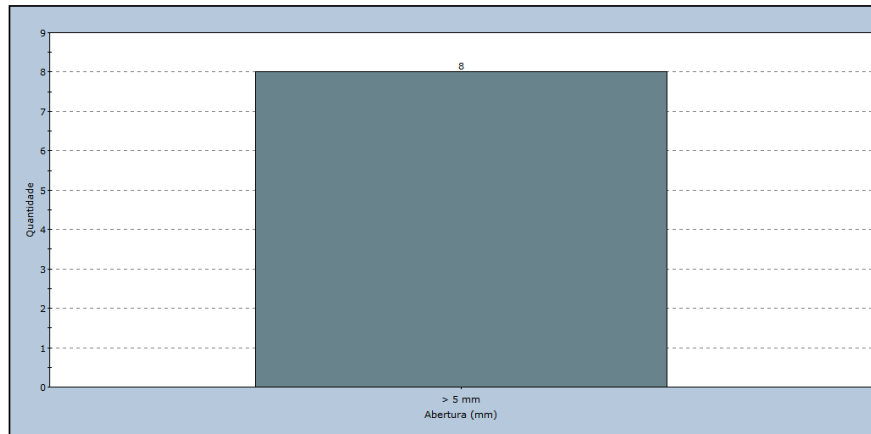
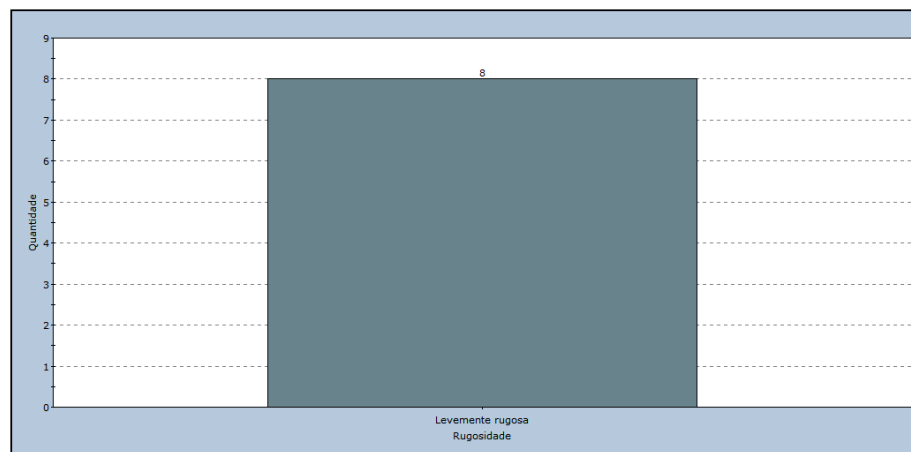
ESPAÇAMENTO**ALTERAÇÃO****PERSISTÊNCIA**

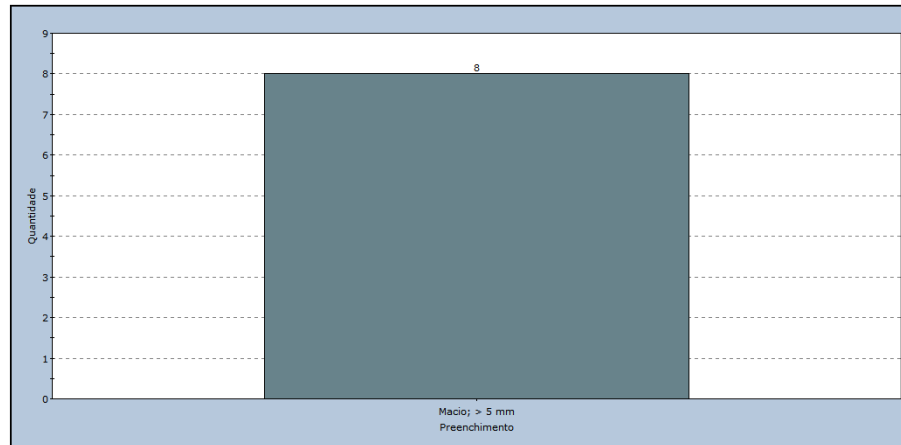
ABERTURA**RUGOSIDADE**

Família 6

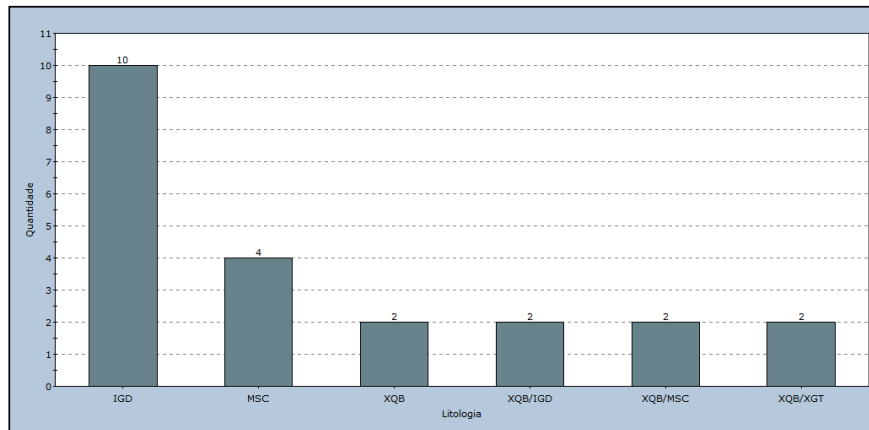
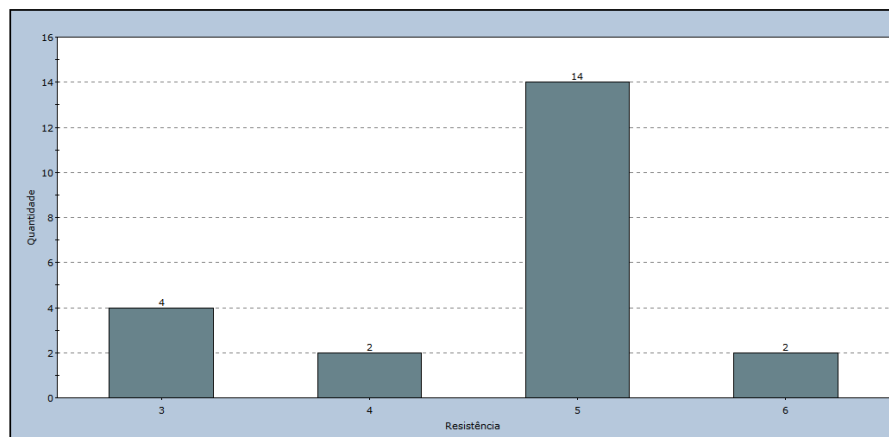
LITOLOGIA

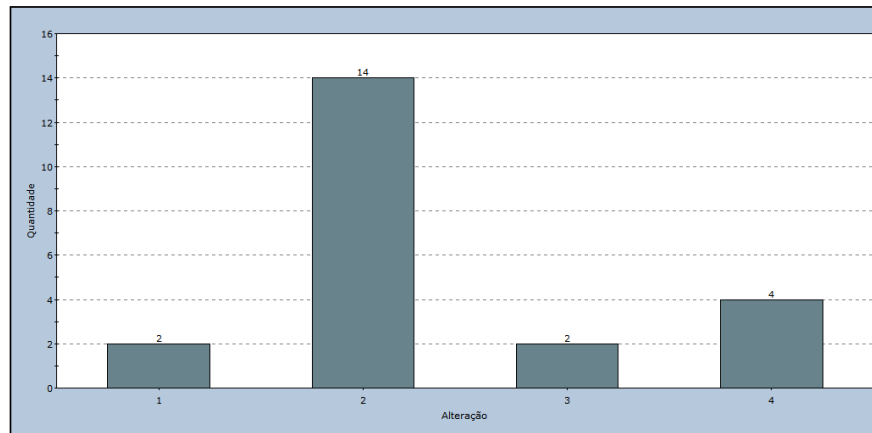
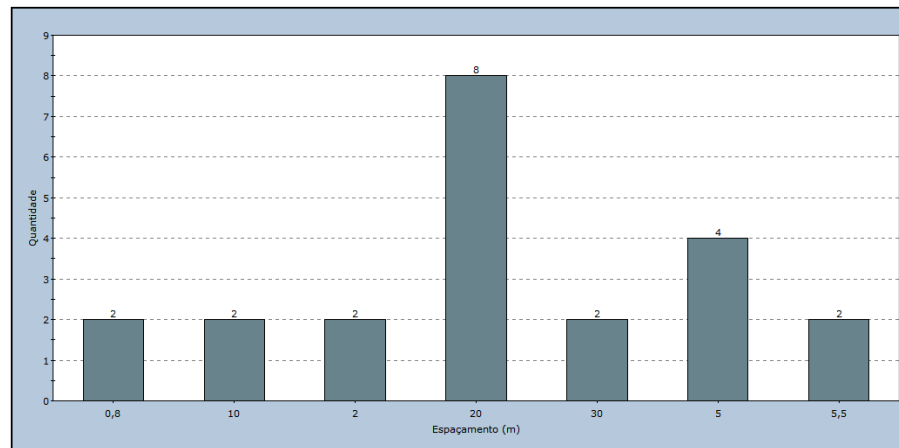
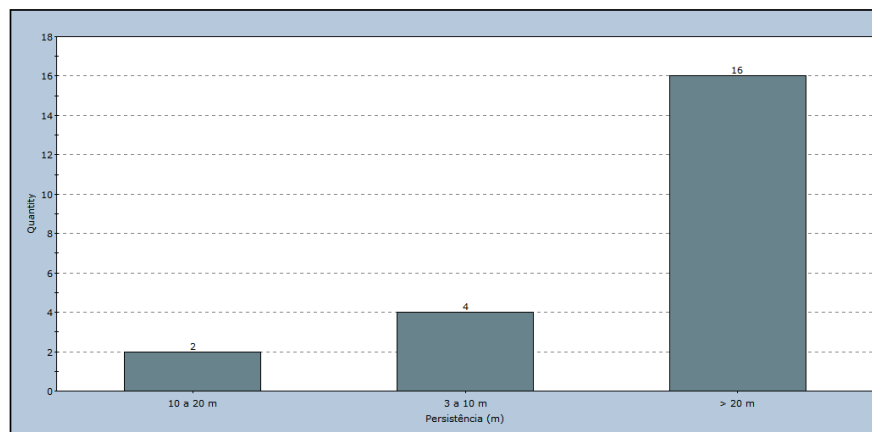
RESISTÊNCIA**ALTERAÇÃO****ESPAÇAMENTO**

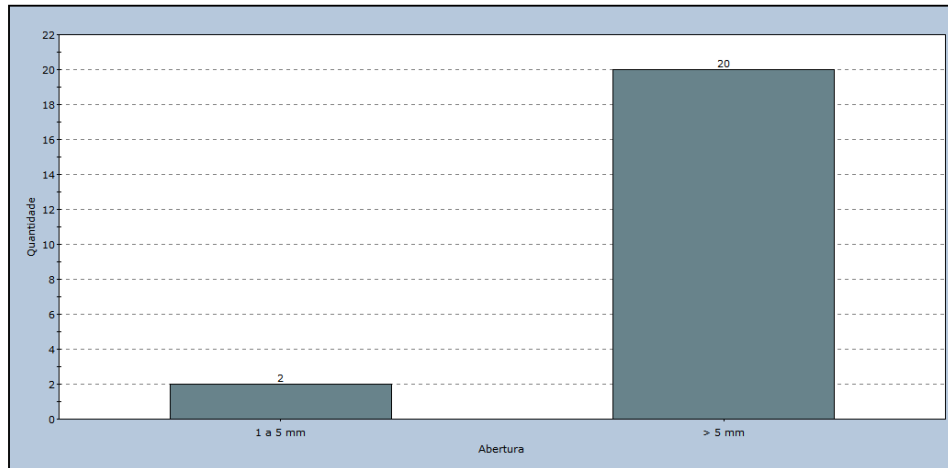
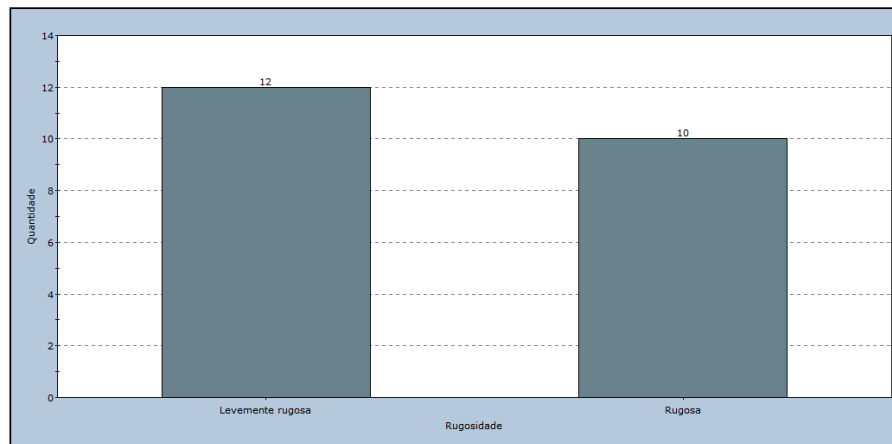
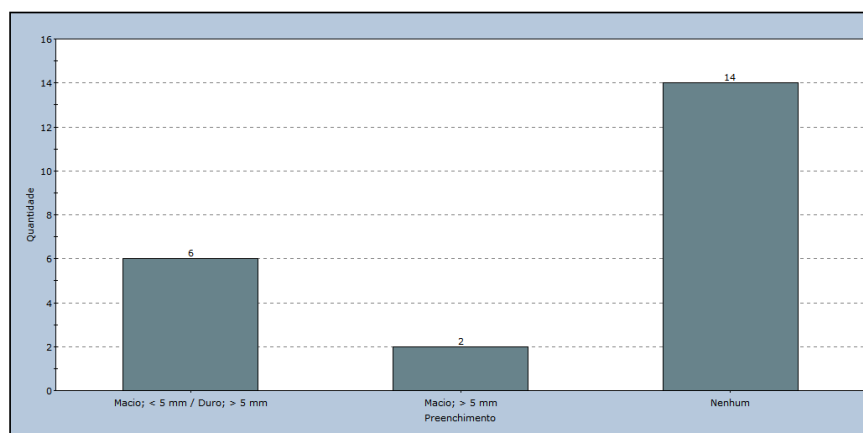
PERSISTÊNCIA**ABERTURA****RUGOSIDADE**

PREENCHIMENTO

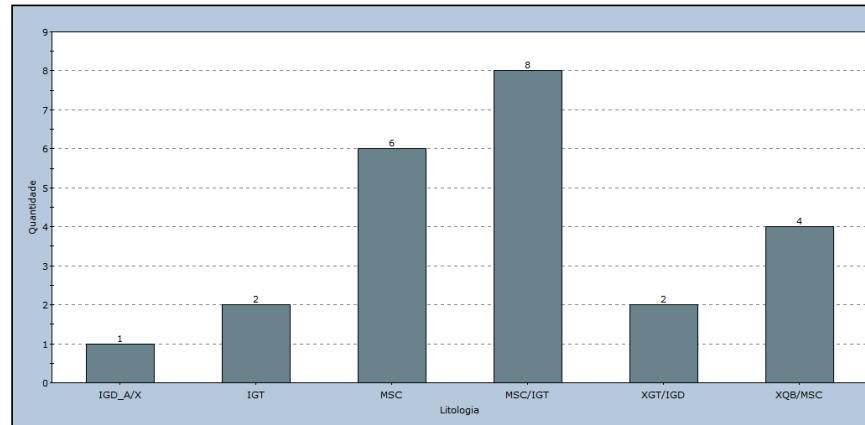
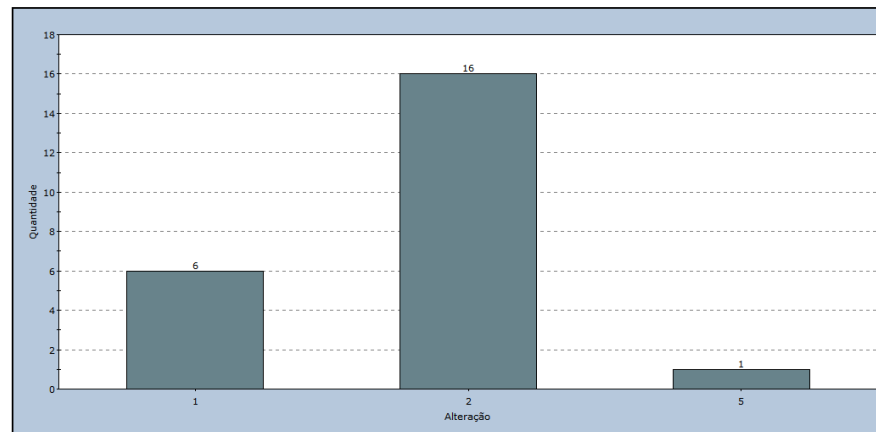
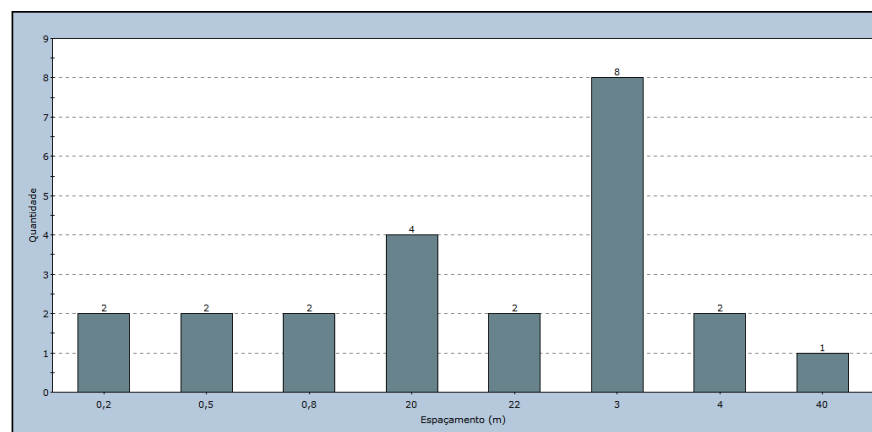
Família 7

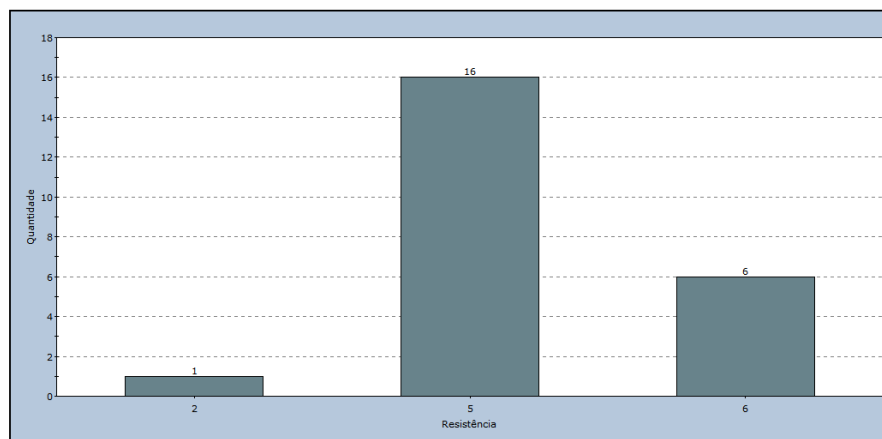
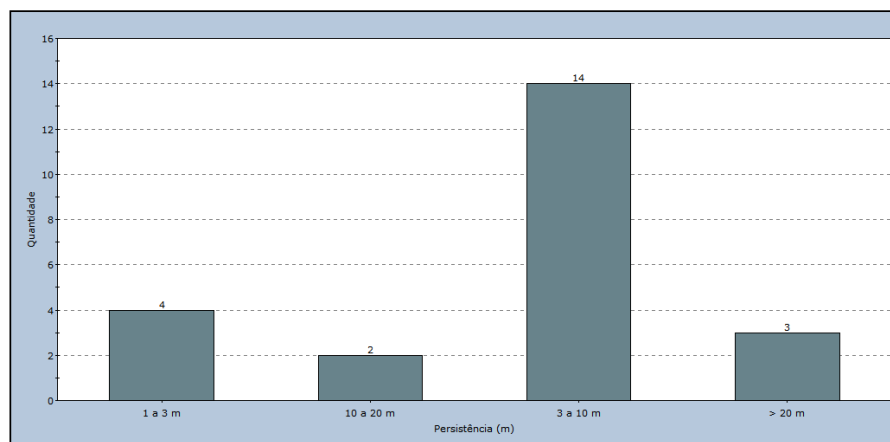
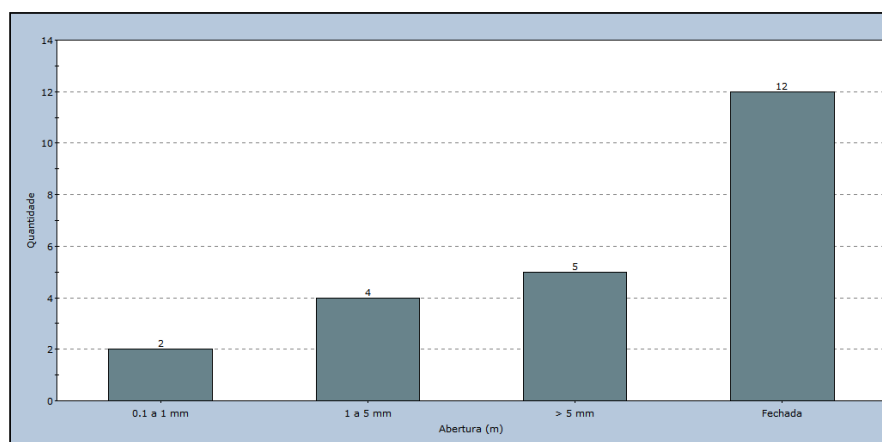
LITOLOGIA**RESISTÊNCIA**

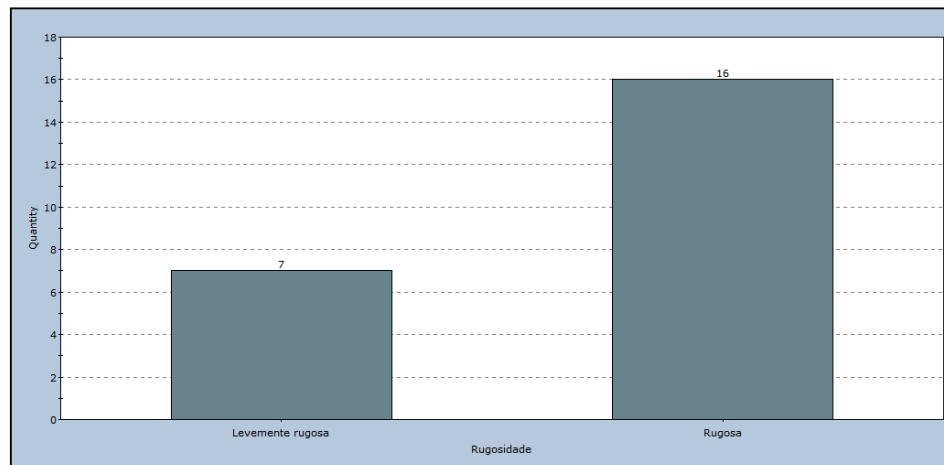
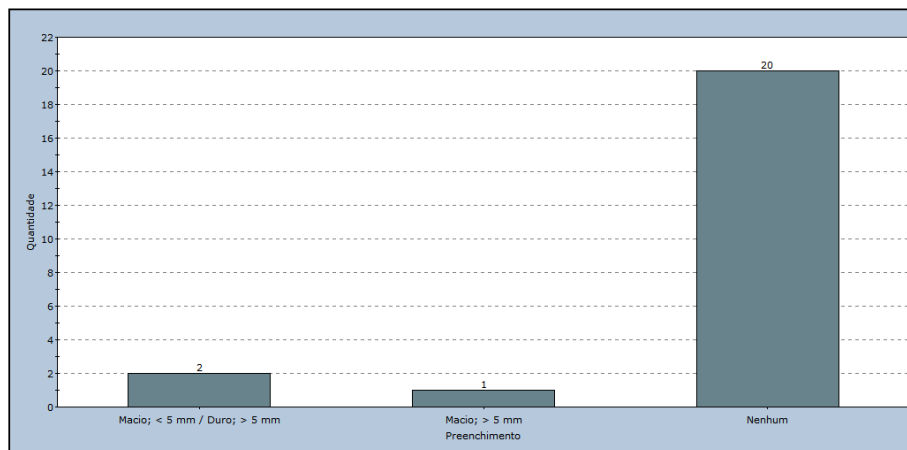
ALTERAÇÃO**ESPAÇAMENTO****PERSISTÊNCIA**

ABERTURA**RUGOSIDADE****PREENCHIMENTO**

Família 8

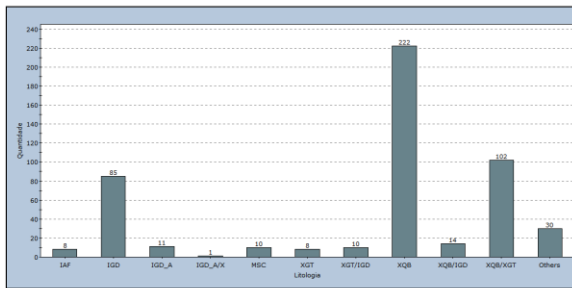
LITOLOGIA**ALTERAÇÃO****ESPAÇAMENTO**

RESISTÊNCIA**PERSISTÊNCIA****ABERTURA**

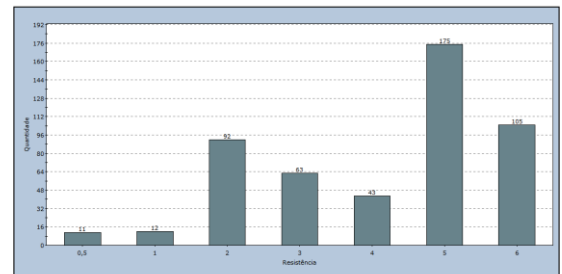
RUGOSIDADE**PREENCHIMENTO**

ANEXO 2: Histogramas das famílias de setor 1B

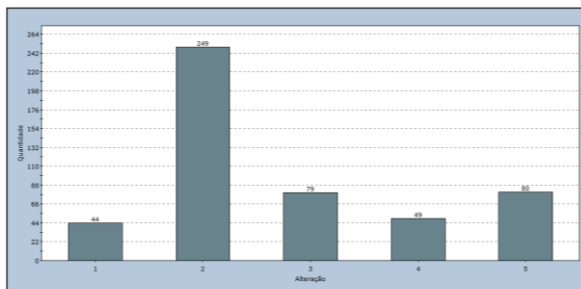
LITOLOGIA



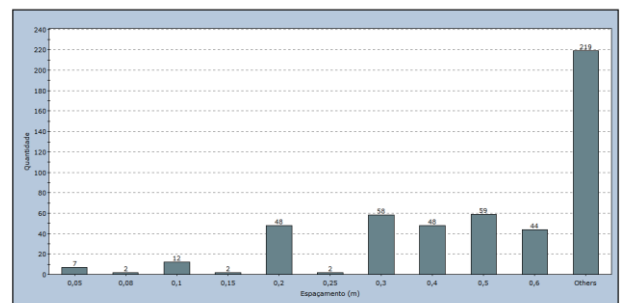
RESISTÊNCIA



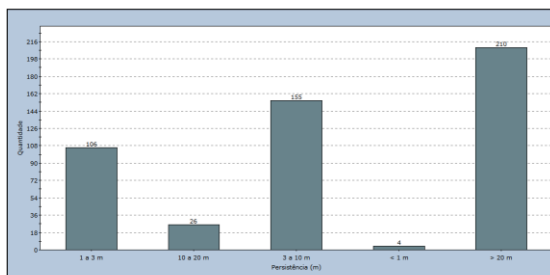
ALTERAÇÃO



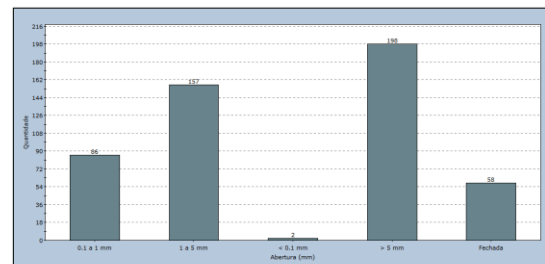
ESPAÇAMENTO



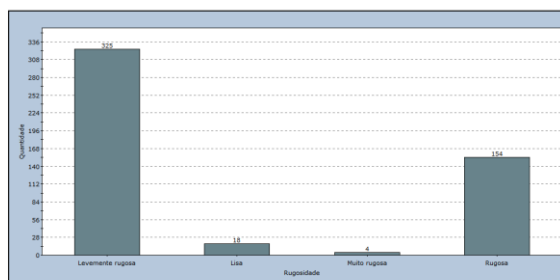
PERSISTÊNCIA



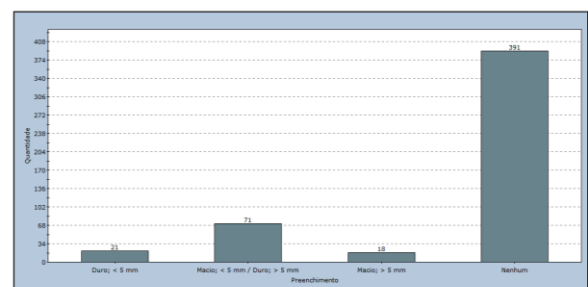
ABERTURA



RUGOSIDADE



PREENCHIMENTO



Anexo 3: Scripts dos testes estatísticos

Teste distribuição normal

```
###Teste Ks (Kolmogorov-Smirnov)
```

```
ks.test(x, y, ..., alternative = c("two.sided", "less", "greater"), exact = NULL)
```

```
ks.test(Planilha2$`ESP (m)`,"pnorm",mean=1.026,sd=2,51, alternative = "greater")
```

```
#shapiro test (Shapiro-Wilk )
```

```
shapiro.test(Planilha2$`ESP (m)`)
```

```
#Teste qui 2 distribuição normal
```

```
x.norm<-Planilha2$`ESP (m)`
```

```
var(x.norm, na.rm = T)
```

```
sd(x.norm, na.rm = T)
```

```
#x.norm.cut<-
```

```
cut(x.norm,breaks=c(0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28,30,32,34,36,38,40))
```

```
##binning data(dados binários)
```

```
x.norm.cut<-cut(x.norm,breaks=c(0,20,30,40,50)) ##binning data(dados binários)
```

```
table(x.norm.cut) ## binned data table
```

```
x.norm.cut
```

```
f.os<-vector()
```

```
for(i in 1:4) f.os[i]<- table(x.norm.cut)[[i]] ## empirical frequencies
```

```
f.os
```

```
?f.os
```

```
chisq.test(x=f.os)
```

###Teste qui 2 distribuição lognormal

```
x.rlnorm<-rlnorm(n=2331,meanlog=-0.56,sdlog=0.88) #espaçamento(m);meanlog e
sdlog ->excel
```

```
x.rlnorm
```

```
#shapiro test
```

```
shapiro.test(Planilha2$`ESP (m)`)
```

###Teste Ks (Kolmogorov-Smirnov)

```
ks.test(x, y, ..., alternative = c("two.sided", "less", "greater"), exact = NULL)
```

```
ks.test(Planilha2$`ESP (m)`,"rlnorm",mean=0.56, sd=0.88, alternative = "greater")
```

###Teste para distribuição exponencial

```
-Kolmogorov-Smirnov
```

```
ks.test(Planilha2$`ESP (m)`,"pexp",rate=1)
```

```
install.packages("vcd")
```

```
-Teste qui quadrado
```

```
x.exp<-Planilha2$`ESP (m)`
```

```
#espaçamento(m)
```

```
x.exp.cut<-cut(x.exp,breaks=c(0,2,10,20,30,40)) ##binning data(dados binários)
```

```
table(x.exp.cut) ## binned data table
```

```
x.exp.cut
```

```
f.os<-vector()
```

```
for(i in 1:5) f.os[i]<- table(x.exp.cut)[[i]] ## empirical frequencies
```

```
f.os
```

```
## computing relative expected frequencies
```

```
##dados do texto .pdf
```

```

#espaçamento(m)
p<-c((pexp(2,rate=1.0)-pexp(0,rate=1.0)),
      (pexp(10,rate=1.0)-pexp(2,rate=1.0)),
      (pexp(20,rate=1.0)-pexp(10,rate=1.0)),
      (pexp(30,rate=1.0)-pexp(20,rate=1.0)),
      (pexp(40,rate=1.0)-pexp(30,rate=1.0)),
      #(pexp(12,rate=1.0)-pexp(10,rate=1.0)))

p
pexp(2,rate=1.0)-pexp(0,rate=1.0)
pexp(10,rate=1.0)-pexp(2,rate=1.0)
pexp(20,rate=1.0)-pexp(10,rate=1.0)
pexp(30,rate=1.0)-pexp(20,rate=1.0)
pexp(40,rate=1.0)-pexp(30,rate=1.0)

## computing expected frequencies
med.exp<-mean(x.exp, na.rm = T) ## sample mean
var.exp<-var(x.exp, na.rm = T) ## sample variance
l.est<-med.exp/var.exp ## lambda estimate (corresponds to rate)

l.est

(pexp(2,rate=l.est)-pexp(0,rate=l.est))*2331
(pexp(10,rate=l.est)-pexp(2,rate=l.est))*2331
(pexp(20,rate=l.est)-pexp(10,rate=l.est))*2331
(pexp(30,rate=l.est)-pexp(20,rate=l.est))*2331
(pexp(40,rate=l.est)-pexp(30,rate=l.est))*2331

f.ex<-c(645,1225,371,74,15) ## expected frequencies vector

```

```

f.ex
X2<-sum(((f.os-f.ex)^2)/f.ex) ## chi-square statistic
gdl<-6-1-1 ## degrees of freedom
1-pchisq(X2,gdl) ## p-value
pchisq(X2,gdl)

###Teste Gamma
-Teste qui-quadrado
x.gam<-Planilha2$`ESP (m)` #espaçamento(dm)
x.gam.cut<-cut(x.gam,breaks=c(0,2,4,6,8,10,20,40)) ##binning data(dados binários)
x.gam.cut
table(x.gam.cut)
f.os<-vector()
for(i in 1:7) f.os[i]<- table(x.gam.cut)[[i]] ## empirical frequencies
f.os
p<-c(pgamma(2,shape=1,scale=1)-pgamma(0,shape=1,scale=1))
  (pgamma(4,shape=1,scale=1)-pgamma(2,shape=1,scale=1))
  (pgamma(6,shape=1,scale=1)-pgamma(4,shape=1,scale=1))
  (pgamma(8,shape=1,scale=1)-pgamma(6,shape=1,scale=1))
  (pgamma(10,shape=1,scale=1)-pgamma(8,shape=1,scale=1))
  (pgamma(20,shape=1,scale=1)-pgamma(10,shape=1,scale=1))
  (pgamma(40,shape=1,scale=1)-pgamma(20,shape=1,scale=1))
pgamma(2,shape=1,scale=1)-pgamma(0,shape=1,scale=1)
pgamma(4,shape=1,scale=1)-pgamma(2,shape=1,scale=1)
pgamma(6,shape=1,scale=1)-pgamma(4,shape=1,scale=1)
pgamma(8,shape=1,scale=1)-pgamma(6,shape=1,scale=1)
pgamma(10,shape=1,scale=1)-pgamma(8,shape=1,scale=1)

```

```

pgamma(20,shape=1,scale=1)-pgamma(10,shape=1,scale=1)
pgamma(40,shape=1,scale=1)-pgamma(20,shape=1,scale=1)

p
# computing expected frequencies
#espaçamento(m)
med.gam<-mean(x.gam, na.rm = T)## sample mean
med.gam
var.gam<-var(x.gam, na.rm = T) ## sample variance
var.gam
l.est<-med.gam/var.gam ## lambda estimate (corresponds to rate)
l.est
a.est<-((med.gam)^2)/var.gam ## alfa estimate
a.est
#espaçamento(dm)
(pgamma(2,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(0,shape=a.est,scale=l.est))*2331
(pgamma(4,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(2,shape=a.est,scale=l.est))*2331
(pgamma(6,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(4,shape=a.est,scale=l.est))*2331
(pgamma(8,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(6,shape=a.est,scale=l.est))*2331
(pgamma(10,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(8,shape=a.est,scale=l.est))*2331
(pgamma(20,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(10,shape=a.est,scale=l.est))*2331
(pgamma(40,shape=a.est,scale=l.est)-pgamma(20,shape=a.est,scale=l.est))*2331

f.ex<-c(2331,0,0,0,0) ## expected frequencies vector
f.ex.f.ex<-c(2331,0,0,0,0) ## expected frequencies vector
f.ex
Qui- quadrado
X2<-sum(((f.os-f.ex)^2)/f.ex, na.rm = T) ## chi-square statistic

```

X2

```
gdl<-6-1-2 ## degrees of freedom
```

```
gdl
```

```
1-pchisq(X2,gdl) ## p-value
```

```
pchisq(X2,gdl)
```

-Teste para distribuição gamma- KS

```
ks.test(Planilha2$`ESP (m)`,"pgamma",shape=2,scale=1, alternative = "greater")
```

##Teste Weibull

```
x.wei<-Planilha2$`ESP (m)` #espaçamento(m), média, desvio padrão e variancia
```

```
mean(x.wei, na.rm = T)
```

```
sd(x.wei, na.rm = T)
```

```
var(x.wei, na.rm = T)
```

```
x.wei.cut<-cut(x.wei,breaks=c(0,10,20,30,40)) ##binning data(dados binários)
```

```
x.wei.cut
```

```
table(x.wei.cut) ## binned data table
```

```
f.os<-vector()
```

```
for(i in 1:4) f.os[i]<- table(x.wei.cut)[[i]] ## empirical frequencies
```

```
f.os
```

```
## computing relative expected frequencies
```

```
#espaçamento(m)
```

```
p<-c((pweibull(1,shape=1,scale=1)-pweibull(0,shape=1,scale=1)),
```



```

(pweibull(2,shape=1,scale=1)-pweibull(1,shape=1,scale=1)),
(pweibull(3,shape=1,scale=1)-pweibull(2,shape=1,scale=1)),
(pweibull(4,shape=1,scale=1)-pweibull(3,shape=1,scale=1)))

pweibull(1,shape=1,scale=1)-pweibull(0,shape=1,scale=1)
pweibull(2,shape=1,scale=1)-pweibull(1,shape=1,scale=1)
pweibull(3,shape=1,scale=1)-pweibull(2,shape=1,scale=1)
pweibull(4,shape=1,scale=1)-pweibull(3,shape=1,scale=1)

p

# computing expected frequencies

#espaçamento(m)

med.wei<-mean(x.wei, na.rm = T)## sample mean
med.wei

var.wei<-var(x.wei, na.rm = T) ## sample variance
var.wei

#espaçamento(m)

l.est<-med.wei/var.wei ## lambda estimate (corresponds to rate)
l.est

a.est<-((med.wei)^2)/var.wei ## alfa estimate
a.est

#espaçamento(m)

(pweibull(1,shape=a.est,scale=l.est)-pweibull(0,shape=a.est,scale=l.est))*1967
(pweibull(2,shape=a.est,scale=l.est)-pweibull(1,shape=a.est,scale=l.est))*1967
(pweibull(3,shape=a.est,scale=l.est)-pweibull(2,shape=a.est,scale=l.est))*1967

```

```
(pweibull(4,shape=a.est,scale=l.est)-pweibull(3,shape=a.est,scale=l.est))*1967
```

```
f.ex<-c(1459,78,44,30) ## expected frequencies vector
```

```
f.ex
```

```
X2<-sum(((f.os-f.ex)^2)/f.ex) ## chi-square statistic
```

```
X2
```

```
#graus de liberdade: n=k-1-m (k:nº de classes;m:parâmetros estimados)
```

```
gdl<-4-1-2 ## degrees of freedom
```

```
gdl
```

```
1-pchisq(X2,gdl) ## p-value
```

```
pchisq(X2,gdl)
```