

LINHAS DE LEVANTAMENTO ESTRUTURAL: CORREÇÃO DO VIÉS DE ORIENTAÇÃO A PARTIR DE PLANILHAS ELETRÔNICAS

Daphne Silva PINO

Denis W. ROY

Alain ROULEAU

Amélia João FERNANDES

Reginaldo Antônio BERTOLO

RESUMO

Um dos procedimentos mais adotados para o estudo de redes de fraturas são as linhas de levantamento estrutural, tanto em trabalhos de Geologia como de Engenharia. Os dados coletados através desse método necessitam ser corrigidos para viés de orientação, sendo a correção proposta por Ruth Terzaghi a mais empregada e amplamente reconhecida. Uma vez que a correção originalmente era feita através de ábacos manuais, e que muitos dos programas atualmente disponíveis para realizá-la não são de acesso livre, este trabalho propõe a execução da correção de viés de orientação de linhas de levantamento através de planilhas eletrônicas, visando tornar o procedimento mais acessível e difundido entre os profissionais brasileiros.

Palavras-chave: Linhas de levantamento; Correção de viés; Terzaghi; Fraturas.

ABSTRACT

SCANLINE SURVEYS: CORRECTING ORIENTATION BIAS BY MEANS OF ELECTRONIC SPREADSHEETS. Scanline surveying is a commonly adopted procedure to study fracture systems, both in Geology and Engineering. The data collected by scanlines must be corrected for orientation bias, and the correction proposed by Ruth Terzaghi is the most applied and widely recognized. Given that the correction was originally made manually by means of abacuses and that many pieces of software available nowadays for bias correction are not freeware, this paper proposes a method of correcting orientation bias in scanline data via electronic spreadsheets, in order to make the procedure more accessible and widespread amongst the Brazilian professionals.

Keywords: Scanlines; Orientation bias correction; Terzaghi; Fractures.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das redes de fraturas é fundamental para a compreensão da história tectônica, deformabilidade, estabilidade, fluxo de fluidos, transporte de contaminantes, armazenamento e extração de petróleo, e mecanismos de fraturamento dos maciços rochosos. Raramente as fraturas são diretamente observáveis em sua forma tridimensional completa, mas aparecem como traços vistos

em superfícies como afloramentos, testemunhos ou taludes, tais como paredes de minas, de pedreiras, cortes de estrada, etc. (MAULDON *et al.* 2001).

Em estudos de Geologia Estrutural, voltados a diversas aplicações, comumente se busca obter uma estimativa estatística dos valores médios e variabilidades de um conjunto de fraturas (YOW JR 1987). Os métodos de coleta de dados podem ser classificados em quatro tipos principais (Tabela 1): (i) amostragem em linha de levanta-

mento (TERZAGHI 1965, PRIEST & HUDSON 1981, ROULEAU & GALE 1985, PRIEST 1993); (ii) amostragem por área ou janela (MCQUILLAN 1974, PRIEST 1993, WU & POLLARD 1995, MOBASHER & BABAIE 2008, GHOSH & MITRA 2009); (iii-iv) amostragem circular, que pode ser linear ou por área (GROSSENBACHER *et al.* 1997; MAULDON 1998; MAULDON *et al.* 1999a, b, 2001; ROHRBAUGH *et al.* 2002; PEACOCK *et al.* 2003; WATKINS *et al.* 2015). Os métodos distinguem-se pela forma de coleta de dados, pelos parâmetros obtidos e pelos vieses a que estão sujeitos (Tabela 1). Entre os mais comumente apontados na literatura (WANG & MAULDON

2006, ZEEB *et al.* 2013, WATKINS *et al.* 2015), estão os vieses: (i) de orientação, devido a fraturas que interceptam a linha ou área de levantamento em ângulos oblíquos; (ii) de truncamento, devido ao limite de resolução de amostragem, o qual é dependente do equipamento utilizado (olho humano, microscópio), e devido ao contraste entre a rocha e as fraturas; (iii) de censura, devido ao limite de tamanho do afloramento, à presença de coberturas (a fratura não está totalmente visível por estar coberta por vegetação, material de alteração, etc.); e (iv) de tamanho, relacionado à probabilidade de uma estrutura ser interceptada por uma linha ou área de

TABELA 1 – Comparativo entre os métodos de levantamento estrutural sistemático.

| MÉTODOS | | | | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | LINHA OU <i>SCANLINE</i> | ÁREA OU JANELA | CIRCULAR (LINHA) | CIRCULAR (ÁREA) |
| Descrição | Medida de estruturas que interceptam uma linha de levantamento sobre um afloramento ou em uma perfuração | * Área: medidas indiretas sobre imagens (aéreas, satélite, etc.) * Janela: medidas diretas sobre o afloramento | Medidas de estruturas que interceptam uma circunferência traçada sobre o afloramento | Medidas de estruturas no interior de uma área circular traçada sobre um afloramento |
| Parâmetros obtidos | Orientação Espaçamento Abertura Frequência | Orientação Abertura Comprimento médio | Densidade Intensidade | Intersecções (nós e ramos) Densidade Intensidade Comprimento médio |
| Vieses | Orientação Truncamento Censura Tamanho | Orientação Truncamento Censura | Censura Truncamento | Censura Truncamento |
| Vantagens | Método rápido Uso de perfurações e/ou poços Mergulhos variados das linhas | Uso de imagens aéreas ou de satélite Permite trabalhar com grandes estruturas e grandes afloramentos | Reduz o viés de orientação Método rápido | Reduz o viés de orientação |
| Desvantagens | 1-D Depende da inclinação da linha | Tempo de execução Depende do tamanho e qualidade do afloramento (coberturas) | Não coleta: orientação, distribuição de comprimento, largura Mais usual em afloramentos sub-horizontais | Não coleta: orientação, distribuição de comprimento, ou largura Mais usual em afloramentos sub-horizontais |

levantamento ser diretamente proporcional ao seu comprimento.

Entre os quatro métodos apresentados (Tabela 1), o mais usualmente empregado é o de linha de levantamento, ou *scanline*. Em muitas situações, é a maneira mais fácil ou a única de coletar dados, como é o caso da perfilagem de poços para a produção de petróleo (PEACOCK *et al.* 2003). Não obstante, os dados de fraturas coletados em *scanlines* estão sujeitos a vieses de orientação, de amostragem e de comprimento da linha de levantamento (Tabela 1). Essa necessidade de correção do viés de orientação em levantamentos de fraturas foi primeiramente apontada por TERZAGHI (1965), e foi seguida por diversos autores que discutiram formas de corrigi-lo (HUDSON & PRIEST 1983; LAPOINTE & HUDSON 1985; LACAZETTE 1991; PRIEST 1993; NARR 1991, 1996; MAULDON & MAULDON 1997; MARTEL 1999; ZEEB *et al.* 2013).

É relevante considerar ainda que, em todas as quatro técnicas de levantamento citadas, são estudados os traços bidimensionais das fraturas, e não diretamente o sistema tridimensional. As relações entre traços bidimensionais e os sistemas tridimensionais de fraturas tem recebido atenção na literatura de Geologia de Engenharia (WARBURTON 1980a, b; BERKOWITZ & ADLER 1998; SLOB *et al.* 2007; MCCLURE *et al.* 2016); não obstante, uma solução satisfatória ainda não foi alcançada. Uma abordagem relativamente simples e que permite inferir propriedades das fraturas tridimensionais é a realização de levantamentos em superfícies de rocha de orientações distintas, levando à obtenção de dados mais representativos da rede de fraturas.

Atualmente, diversos programas de computador para a projeção e correção automática de estruturas foram desenvolvidos, destacando-se duas categorias: (i) de uso livre, para uso não-comercial (p.e. InnStereo, de SCHOENBERG 2015; OpenStereo, de GROHMANN & CAMPANHA 2010; Stereo32, de RÖLLER & TREPMAN 2010; Stereographic Projection, de KOZANIS 2006; Stereonet, de ALLMENDINGER 2019); e (ii) de uso livre limitado ou pago (p.e. DIPS, da ROCSCIENCE 2019; GEORient, da ROD HOLCOMBE 2015; WellCAD, da ALT 2019). Considerando-se que pode ser difícil encontrar a maioria das ferramentas gratuitas, PINO (2012) desenvolveu um procedimento para correção do viés de orientação de linhas de levantamento através de planilhas eletrônicas, acessíveis de praticamente qualquer computador. Esse proce-

dimento foi revisado por PINO (2019) e é apresentado em detalhe e discutido neste trabalho.

2 NOMENCLATURA UTILIZADA

A determinação da orientação de estruturas depende da utilização correta de sua terminologia. É fundamental dominar os termos designados a estruturas planares e a lineares.

- Atitude: orientação de um plano ou uma linha no espaço, é composta pela direção e pelo mergulho;

- Direção (*strike*): ângulo entre a linha horizontal de um plano e o Norte geográfico, variando de 0 a 360°, medidos no sentido horário. A convenção geralmente empregada é a denominada regra da mão direita (*right hand rule*, “rhr”), segundo a qual os dedos da mão direita devem estar no mesmo sentido do mergulho do plano (o qual representa a estrutura), quando se posiciona a mão direita sobre a superfície superior da estrutura, de modo que o dedo polegar aponte no valor da direção que deve ser utilizada (Figura 1);

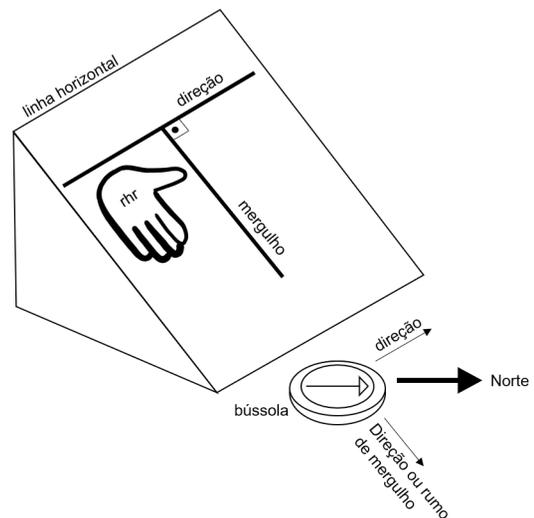


FIGURA 1 – Representação esquemática de elementos de uma estrutura planar no contexto da regra da mão direita (rhr): direção, mergulho e rumo de mergulho. Os dedos da mão direita devem estar no mesmo sentido do mergulho do plano quando se posiciona a mão direita sobre a superfície superior da estrutura, de modo que o dedo polegar aponte no sentido da direção do plano.

- Mergulho (*dip*): inclinação de um plano em relação à horizontal, pode ser entendido como o ângulo entre a superfície horizontal e a reta de

maior declive da estrutura, variando de 0 a 90° (Figura 1);

- Direção ou rumo do mergulho (*dip direction*): ângulo horizontal entre a projeção horizontal da linha de mergulho e uma coordenada geográfica (Norte), variando de 0 a 360°, medidos no sentido horário. É perpendicular à direção de uma estrutura planar (segundo a rhr, soma-se 90° à direção da estrutura planar e obtém-se o valor angular do rumo do mergulho);

- Direção ou rumo de um polo ou reta (*trend*): direção de mergulho do polo ou reta; é o ângulo horizontal entre a projeção horizontal do polo ou da reta e uma coordenada geográfica (Norte), variando de 0 a 360°;

- Mergulho de um polo ou reta (*plunge*): também denominado caimento, é o ângulo de um polo ou reta em relação a sua projeção ortogonal no plano horizontal, variando de 0 a 90°;

- *Rake (pitch)*: ângulo entre uma linha (ou feição linear) e a direção ou horizontal do plano em que a linha se encontra, variando de 0 a 90°.

Há ainda diversas possibilidades de representação numérica da orientação de um plano de fratura (ou outra estrutura). Algumas das formas mais comumente utilizadas são (note-se que todas as medidas indicadas abaixo representam o mesmo plano):

- Azimute (*azimuth*): ângulo da direção do plano/mergulho = 150/45 ou N150/45. É uma medida frequentemente obtida com a bússola tipo Brunton;

- Quadrante (*quadrante*): indica-se o quadrante da direção do plano (NE, SE, SW ou NW), com o ângulo contado sempre a partir de Sul ou de Norte, e o quadrante para o qual a estrutura mergulha = S30E/45SW, representa estrutura de direção de 30° de sul para leste e mergulho de 45° para SW;

- Direção de mergulho (*dip direction*): direção do mergulho/mergulho = 240/45 ou N240/45. É uma medida em geral obtida com a bússola tipo Clar.

Definem-se ainda as nomenclaturas de estruturas utilizadas neste documento e comumente encontradas na literatura:

- Estrutura (*structure*): termo geral para indicar uma descontinuidade ou feição geométrica física em uma massa rochosa; pode referir-se a fraturas, falhas, veios, diques, foliação, lineação mineral, etc;

- Fratura (*fracture*): termo genérico para designar descontinuidades físicas (rupturas) em uma massa rochosa, como juntas ou falhas;

- Família ou grupo de fraturas (*fracture set*): conjunto de fraturas cujos polos se concentram em um diagrama de densidade em 20° ou menos em largura angular; trata-se de uma classificação analítica das fraturas. As fraturas de uma família não necessariamente apresentam uma origem genética comum. A gênese é uma análise adicional que deve utilizar outros parâmetros e não somente a atitude das fraturas;

- Falha (*fault*): fratura através da qual houve notório deslocamento relativo paralelo à sua superfície, por cisalhamento, podendo o movimento ser determinado através de indicadores cinemáticos. Para deslocamentos pequenos, centimétricos ou menores, é possível utilizar o termo microfalha (*microfault*);

- Junta (*joint*): termo geral para indicar uma fratura geológica ao longo da qual não se observa deslocamento significativo;

- Sistema de fraturas (*fracture system*): conjunto das fraturas como são observadas na natureza, podendo ser dividido em subconjuntos ou famílias.

Na literatura, a maioria dos autores atribui um sentido geral ao termo “fratura”, como apresentado acima; não obstante, o termo “junta” costumava designar fraturas sem movimento aparente, embora na última década tenha sido empregado para referir-se também a fraturas extensionais (HANCOCK 1985, POLLARD & AYDIN 1988, DUNNE & HANCOCK 1994, ENGELDER 1994, NEVES 2011, FOSSEN 2018, PEACOCK & SANDERSON 2018, PEACOCK *et al.* 2018).

3 PROJEÇÕES ESTEREOGRÁFICAS DE PLANOS E RETAS

Uma vez esclarecida a terminologia utilizada ao se tratar de estruturas, é necessário compreender como se dá sua representação gráfica, que permitirá a análise de uma área de estudo.

3.1 Tipos de redes

Para a projeção gráfica de estruturas geológicas, são comumente utilizadas duas redes circulares: (i) rede estereográfica (Figura 2a), ou rede de igual-ângulo, ou rede de Wulff (em homenagem a G. V. Wulff, que a adaptou para uso em Cristalografia); e (ii) rede de igual-área de Lambert, ou rede de Schmidt, ou ainda rede de Schmidt-Lambert (Figura 2b). Na prática, ambos os tipos são chamados de estereogramas ou estereoredes. Para fins de representação, por vezes opta-se ainda pelo uso de uma rede polar (Figura 2c).

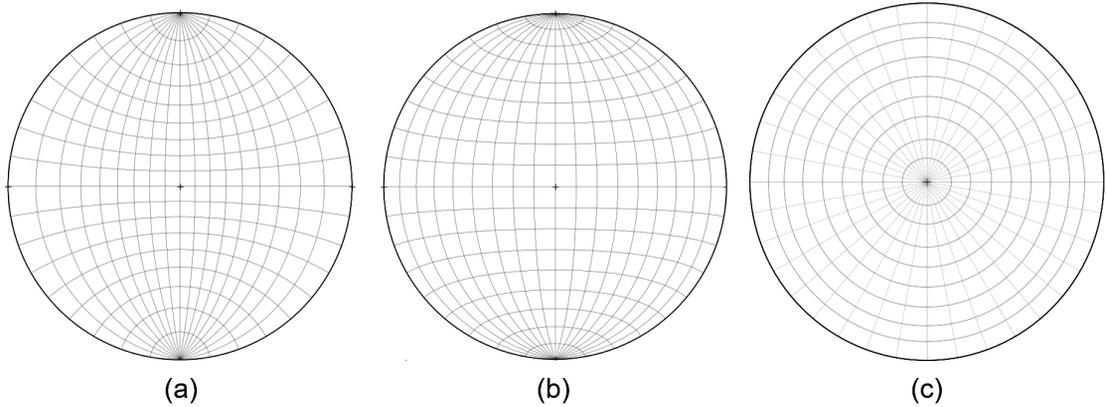


FIGURA 2 – Tipos de redes para projeção de estruturas: (a) igual-ângulo ou Wulff; (b) igual-área ou Schmidt-Lambert; (c) polar. Malhas das redes com espaçamento de 10°.

Na rede de igual-área, cada divisão da esfera de referência permanece com áreas iguais na projeção, o que não ocorre com a rede de igual-ângulo. Por outro lado, a rede de igual-área não preserva as relações angulares. Em Cristalografia, as relações angulares são particularmente importantes, de modo que a rede mais usada é a de Wulff, enquanto em Geologia Estrutural, a densidade relativa de dados é frequentemente mais relevante, sendo mais comumente utilizada a rede de igual-área.

Os elementos da rede de igual-área são: linhas “norte-sul” denominadas grandes círculos; linhas “leste-oeste”, chamadas pequenos círculos; e círculo primitivo (no sentido de “fundamental”). Os grandes círculos (ou círculos máximos, ou círculos maiores) na rede representam um conjunto de planos com a mesma direção e todos os mergulhos possíveis, de 0 a 90°. O círculo primitivo equivale ao perímetro da rede, e representa um plano horizontal. Os pequenos círculos podem ser entendidos como os caminhos pelos quais as projeções das linhas se moveriam, se giradas ao redor de um eixo N-S horizontal.

3.2 Hemisférios de projeção

Diferentemente da Cristalografia, que utiliza a projeção de dados na rede no hemisfério superior, em Geologia Estrutural habitualmente se trabalha com o hemisfério inferior (Figura 3). Para efeitos de visualização, seria como olhar para baixo em uma tigela na qual um semicírculo de papelão foi ajustado em um determinado ângulo – o diâmetro exposto do semicírculo será uma linha reta, e sua parte curva descreverá uma curva no fundo da tigela, que quando projetado no plano equatorial horizontal se domina projeção ciclográfica do plano (Figura 3).

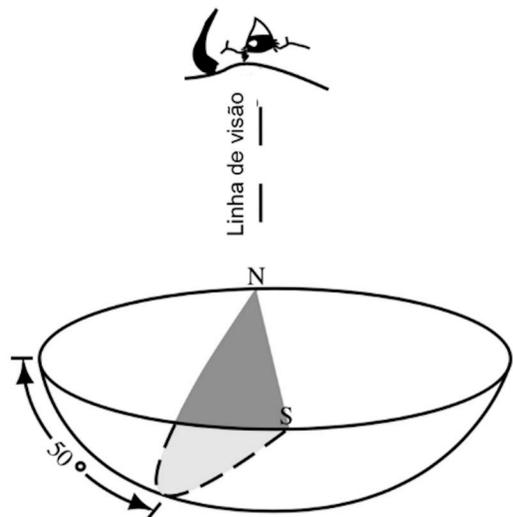


FIGURA 3 – Vista oblíqua da projeção de um plano N-S (em cinza) no hemisfério inferior. Adaptado de ROWLAND *et al.* (2007).

3.3 Projeções planares e polares

Enquanto planos são representados por grandes círculos em um estereograma, retas são representadas por pontos. Considerando-se que o polo de um plano é a linha reta perpendicular ao plano, em termos de projeção estereográfica, será a projeção da intersecção normal ao plano com a esfera de projeção, representada pelo ponto que se encontra a 90° do grande círculo que representa o plano, medidos ao longo da linha que contém a vertical (centro do círculo equatorial) e a linha de maior declive do arco. Isso permite representar um plano através de um ponto na rede, ao invés de um grande círculo

– o que se denomina projeção polar. Considere-se, por exemplo, um plano de direção leste e mergulho 30° a sul (N090/30): seu polo apresentará 60° de mergulho com rumo norte (Figura 4).

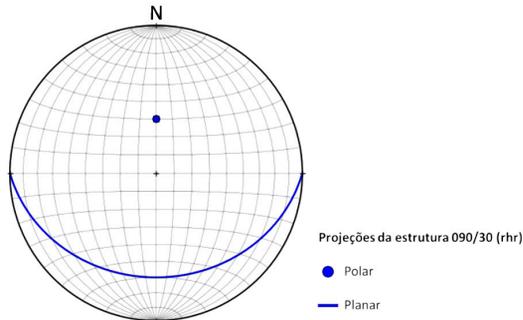


FIGURA 4 – Projeções planar e polar de um plano N090/30, em hemisfério inferior de diagrama de igual-área, malha de 10° .

Observa-se, portanto, que o rumo do polo será igual à direção do plano somada 270° (ou subtraída de 90°), e que seu mergulho será o ângulo complementar do mergulho do plano, isto é, a soma de ambos é igual a 90° .

4 EFEITOS DA DIREÇÃO DE OBSERVAÇÃO DE ESTRUTURAS

O espaçamento de fraturas de famílias presentes em uma determinada área é um dado essencial para diversas aplicações (TERZAGHI 1965). Entretanto, quando as perfurações ou exposições de rocha estudadas apresentam orientações aproximadamente uniformes, os dados coletados não possibilitarão uma estimativa representativa sobre a densidade de todas as famílias presentes na área. Por exemplo, em um afloramento subvertical (Figura 5a) predomina a identificação de fraturas de alto (de 60 a 90°) a médio (de 30 a 60°) ângulo de mergulho (Figura 6a), pois a observação tende a ser feita em linhas sub-horizontais. Por outro lado, uma perfuração vertical (Figura 5b) intercepta principalmente as fraturas de baixo (de 0 a 30°) ângulo de mergulho (Figura 6b). Além da variação do mergulho das linhas de levantamento, também é necessário diversificar suas direções. Assim, devem ser feitas medições em paredes de afloramentos com orientações distintas; da mesma forma, quando o levantamento é feito em perfurações, o ideal é que eles sejam inclinados e com direções fazendo um ângulo de 120° entre eles (TERZAGHI 1965). A realização de no mínimo três *scanlines*

aproximadamente perpendiculares entre si, sendo uma delas subvertical, é fundamental para a obtenção de informações mais completas sobre a rede de fraturas, uma vez que proporciona a amostragem de uma gama mais ampla de orientações (TERZAGHI 1965).

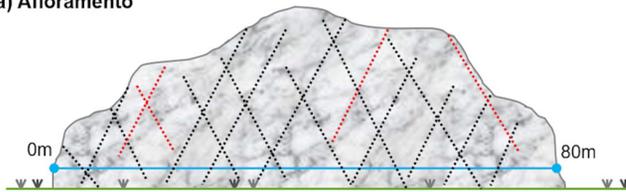
O viés de orientação pode resultar em uma estimativa não confiável da abundância relativa de famílias de fraturas em uma área de estudo (TERZAGHI 1965, ROULEAU & GALE 1985, PRIEST 1993). Isso é extremamente relevante ao se caracterizar a geometria de uma rede de fraturas, pois mesmo onde a rede de fraturas regional é bem desenvolvida, é possível que exista uma variação notável da orientação de fraturas em curtas distâncias (TERZAGHI 1965).

As *scanlines* podem ser realizadas em: (i) afloramentos, onde usualmente se coloca uma fita métrica para referência e as estruturas são estudadas diretamente sobre a exposição de rocha (Figura 5a); (ii) furos de sondagem (Figura 5b) e/ou poços não revestidos, cuja análise pode ser feita em testemunhos de rocha orientados ou, mais comumente, através de perfilagens geofísicas, como o imageamento acústico e óptico. Além de informações gerais, contendo a orientação da *scanline*, suas coordenadas inicial e final, rochas presentes, entre outros, durante o levantamento são realizadas observações sistemáticas de cada estrutura interceptada, com relação aos seguintes aspectos: distância em que intercepta a linha de observação; atitude; comprimento; rugosidade; material geológico; intersecção com outras estruturas; indicadores cinemáticos; indícios de fluxo (p.e. decomposição da rocha junto à fratura, oxidação, película, precipitação, ocorrência de água ou vegetação); etc. Exemplos de aplicação desse levantamento sistemático incluem MAULDON & MAULDON (1997), FERNANDES & ROULEAU (2008), PINO (2012, 2019), FIUME (2013), FANTI *et al.* (2017) e SARTORIO (2019).

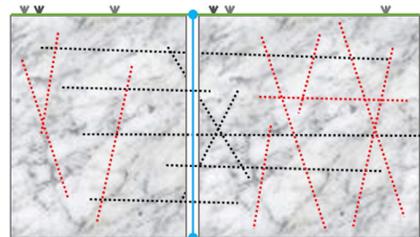
O termo ponto cego é utilizado por TERZAGHI (1965) para referir-se ao polo da superfície de um afloramento. As fraturas cujos polos coincidem com esse polo e que portanto não poderiam ser observadas nesse afloramento são denominadas “estruturas de ponto cego”. Analogamente, a zona cega de um furo de sondagem é o local dos polos das fraturas paralelas ao furo, e corresponde ao grande círculo a 90° do ponto axial do furo (TERZAGHI 1965). Da mesma forma, as fraturas representadas por polos nessa zona são denominadas “estruturas de zona cega”.

SCANLINE OU LINHA DE LEVANTAMENTO

(a) Afloramento



(b) Perfuração vertical



- Afloramento rochoso
- Rocha em subsuperfície
- Superfície do terreno
- Scanline ou linha de levantamento
- Fraturas interceptando a scanline
- Fraturas que não interceptam a scanline
- Perfuração vertical

FIGURA 5 – Esquema do método de levantamento por *scanline* em (a) afloramento de parede subvertical e (b) perfuração vertical. Apenas as estruturas (em preto) que cruzam as linhas de levantamento (em azul) são medidas. A distância em que uma estrutura intercepta a linha é sempre observada. Adaptado de PINO (2012).

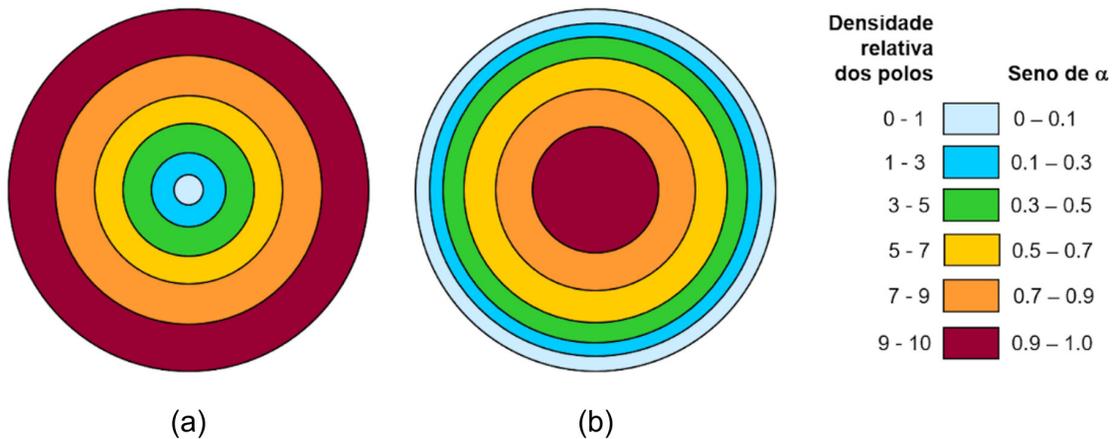


FIGURA 6 – Diagramas de densidade idealizados para fraturas aleatórias observadas em (a) afloramento de parede subvertical e (b) perfuração subvertical. Adaptado de TERZAGHI (1965).

Ao se considerar que a *scanline* realizada em um afloramento equivale a uma linha de levantamento como a de um furo de sondagem, porém comumente com ângulo de mergulho mais baixo, é possível extrapolar a denominação de “zona cega” para os estudos em superfícies de afloramentos.

A partir da definição das zonas cegas, torna-se evidente a importância da escolha de orientações adequadas para a realização das *scanlines*. Note-se que duas zonas cegas irão se cruzar em uma ou duas áreas, entretanto, se elas foram apropriadamente definidas (isto é, se forem aproxima-

damente perpendiculares entre si), nenhum polo estará na zona cega de três *scanlines* ao mesmo tempo (Figura 7). Ademais, haverá vários intervalos de orientação visíveis pelas três linhas de observação (Figura 7).

É relevante apontar que a zona cega não depende dos dados, mas é uma característica dependente da orientação da linha de levantamento que afeta os dados (YOW JR 1987). A partir do conceito de zona cega introduzido por TERZAGHI (1965), que sugeriu valores de 20 a 30°, GOODMAN (1976) e MCEWEN (1980) es-

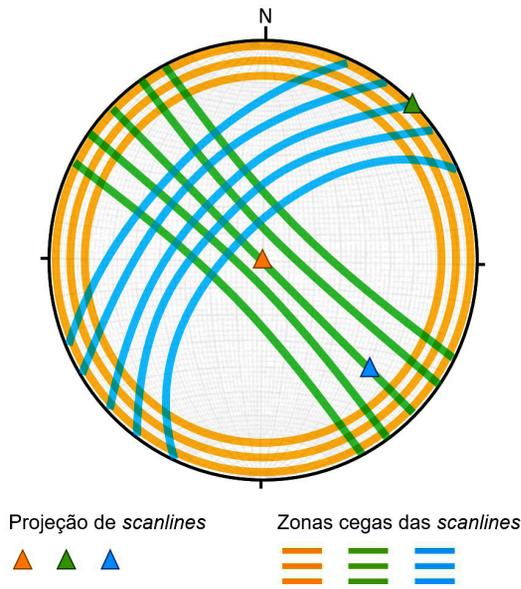


FIGURA 7 – Sobreposição de zonas cegas de 3 *scanlines* de orientações distintas, destacadas em cores diferentes. Adaptado de ROY (2011).

timaram o tamanho das zonas cegas em 20°, ou seja, para um poço vertical, as fraturas com mergulhos entre 70 e 90° estariam na zona cega. Por sua vez, YOW Jr. (1987) calculou que, se o erro aleatório na amostragem de orientação de fraturas for esperado em ±1° e um erro máximo de 20% no peso atribuído às fraturas for permitido (parâmetro descrito no item 6.5), a zona cega resultante para a *scanline* será de aproximadamente ±10°. Dessa forma, o tamanho da zona cega aumentaria proporcionalmente ao erro aleatório de medição, se for mantida constante a precisão dos pesos atribuídos (YOW Jr. 1987).

5 CORREÇÃO DE TERZAGHI (1965) OU DE VIÉS DE ORIENTAÇÃO

Um viés de amostragem é introduzido em qualquer levantamento estrutural em que o ângulo alfa (α) entre uma família de fraturas e a linha de observação (*scanline*) seja diferente de 90° (TERZAGHI 1965). Isso significa que estruturas que formam um ângulo baixo ($\alpha < 20^\circ$) com a *scanline*, por se situarem próximas da zona cega, têm menos chances de serem observadas do que aquelas que formam um ângulo elevado ($\alpha \cong 90^\circ$) (Figuras 5 e 6). A correção de espaçamento baseada no ângulo α produz uma estimativa realista da densidade das fraturas, em oposição à densidade

observada diretamente na *scanline*. Essa correção é conhecida como correção de TERZAGHI (1965); e não é realizada para as estruturas com ângulo de intersecção inferior a 20° com a linha de levantamento, uma vez que, se essas estruturas forem abundantes, deverão ser interceptadas por uma ou mais das outras linhas de levantamento, fornecendo então dados mais confiáveis para a estimativa de espaçamento das fraturas (TERZAGHI 1965).

Os quatro passos básicos para a correção do viés de orientação, conforme proposto por TERZAGHI (1965), são: (i) determinação da zona cega; (ii) elaboração do diagrama de densidade relativa, aplicando o peso igual a $1/\text{seno}(90-\alpha_{\text{polo}})$, onde α_{polo} é o ângulo entre a linha de levantamento e o polo da estrutura (Figura 6); (iii) determinação das principais famílias de fraturas; (iv) estimativa do espaçamento (distância entre fraturas) ou densidade (número de fraturas por unidade de distância) de fraturas por família.

Para a execução da correção de viés, considere-se que as estruturas cruzam a linha de levantamento em um ângulo α . O número $N\alpha$ das estruturas interceptadas pela *scanline* será dado pela Eq. 1 (TERZAGHI 1965):

$$N\alpha = \frac{L \cdot \text{sen}(\alpha)}{W_{\text{real}}} \quad \{\text{Eq. 1}\}$$

onde L [L] é o comprimento da linha de levantamento, α [graus] é o ângulo entre a linha de levantamento e os traços dos planos das estruturas na linha de levantamento, e W_{real} [L] é o espaçamento real entre as estruturas, isto é, a distância ortogonal entre elas (Figura 8).

O valor de $N\alpha$ varia de L/W_{real} (para estruturas perpendiculares à linha de levantamento, cujo α é igual a 90°) a zero (para as estruturas paralelas à linha de levantamento, cujo α é 0°). Dessa for-

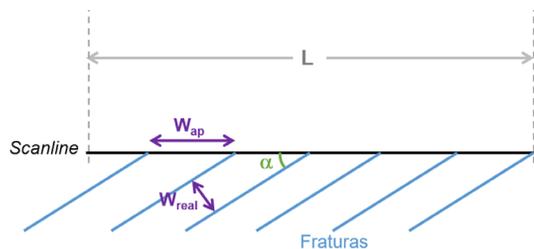


FIGURA 8 – Linha de levantamento (preto) de comprimento L (cinza), interceptando uma única família de fraturas (azul), de espaçamento real W_{real} (em oposição ao espaçamento aparente W_{ap} , ambos em roxo) em um ângulo α (verde). Adaptado de TERZAGHI (1965).

ma, $N\alpha$ não reflete a abundância real das estruturas pertencentes a uma família em determinada rocha (TERZAGHI 1965).

Ao substituir o número de estruturas $N\alpha$ por um valor $N90$, representando o número de estruturas com a mesma orientação que teria sido observado em uma linha de levantamento com o mesmo comprimento, porém interceptando as estruturas em um ângulo de 90° (Eq. 2), é possível aumentar a precisão da projeção polar das estruturas em estereogramas (TERZAGHI 1965). Deve-se atentar que o uso de $N90$ representa um aumento teórico e uma potencial superestimação do número real de estruturas no local. Não obstante, valores baixos de α não permitem a realização de uma correção adequada, uma vez que nesses casos o número de estruturas interceptadas pela linha de levantamento é influenciado significativamente por variações locais no espaçamento e na continuidade das estruturas. Além disso, uma única estrutura interceptada ($N\alpha=1$) a um baixo ângulo poderia corresponder tanto a uma estrutura aleatória isolada como a um membro de uma família importante.

$$N90 = \frac{N\alpha}{\text{sen}(\alpha)} \quad \{\text{Eq. 2}\}$$

onde $N\alpha$ é o número de estruturas de uma família interceptadas pela *scanline*, e α [graus] é o ângulo em que a *scanline* intercepta essas estruturas.

As frequências médias das fraturas medidas ao longo de uma linha de levantamento apenas serão representativas do sistema de fraturas se a amostragem for realizada em uma região estatisticamente homogênea (PEACOCK *et al.* 2003). Se a frequência da família de fraturas não for homogênea ao longo de uma *scanline*, os dados podem ser subdivididos em subdomínios homogêneos (WOJTAL 1989, PEACOCK *et al.* 2003).

6 PRINCÍPIOS E FÓRMULAS PARA A CORREÇÃO DE VIÉS POR PLANILHAS ELETRÔNICAS

Neste item são descritas as fórmulas para aplicação da correção de viés de orientação em dados de linha de levantamento estrutural, através do uso de planilhas eletrônicas. Os cálculos propostos visam a correção eletrônica com programas comumente disponíveis aos usuários, sem necessidade de assinatura, baseados nos ábacos manuais propostos por TERZAGHI (1965).

6.1 Dados de fraturas

Para a aplicação da correção de viés de orientação, ou correção de TERZAGHI (1965), alguns dados de campo são fundamentais: (i) tipo da estrutura (fratura, foliação, veio, falha, etc); (ii) direção da estrutura, conforme a regra da mão direita (rhr); (iii) mergulho da estrutura; (iv) posição da estrutura na linha de levantamento; (v) rumo da linha de levantamento; (vi) mergulho da linha de levantamento. Dessa forma, o início da planilha eletrônica poderá ser organizado conforme sugerido na tabela 2.

Note-se que no topo e à esquerda, as colunas (letras) e as linhas (números) da planilha eletrônica estão identificadas, de modo a facilitar a reprodução (Tabela 2). Este formato de apresentação está presente nas demais tabelas e figuras referentes à elaboração de cálculos em planilha eletrônica. Deve-se utilizar uma planilha por *scanline*.

6.2 Cálculo da orientação dos polos das fraturas

O primeiro passo é avaliar o ângulo “alfa polo” (α_{polo}) entre a linha de levantamento (*scanline*) e o polo de cada estrutura. Dessa forma, é necessário calcular o rumo e o mergulho do polo para cada estrutura (colunas F e G a partir da linha

TABELA 2 – Informações de campo no início da planilha eletrônica para correção de viés de orientação.

| Coluna/ Linha | A | B | C | D | E | F | G |
|------------------|-------------------|-------------------|---------------|----------|--------------------------------|----------------|--------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | | | | |
| 2 | Nº estrutura | Tipo de estrutura | Direção (rhr) | Mergulho | Posição na <i>scanline</i> (m) | Rumo (do polo) | Mergulho (do polo) |
| 3 | - | <i>Scanline</i> | - | - | - | 78 | 0 |
| 4 | 1 | Fratura | 153 | 46 | 0,5 | | |
| 5 | 2 | Fratura | 325 | 67 | 1,10 | | |
| 6 | 3 | Fratura | 122 | 51 | 1,84 | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| □ | □-3 | Fratura | 114 | 49 | 75,6 | | |

Obs.: valores numéricos aqui indicados nas colunas C a G são exemplos, devendo ser inseridos os dados reais de campo para a correção de viés.

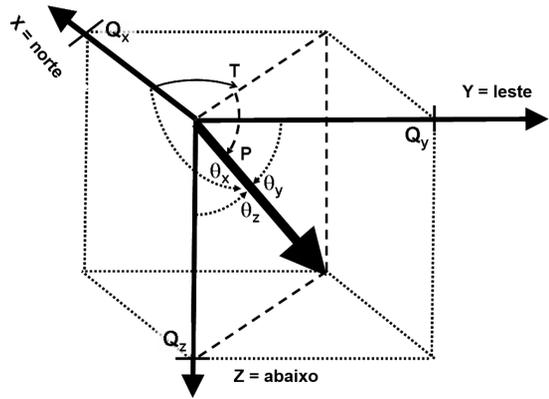
□: última linha com dados de fraturas.

4 na tabela 2). Para o uso do Microsoft Excel® em português, as fórmulas utilizadas são as apresentadas na tabela 3 (ressalta-se que a tabela é indicada parcialmente a fim de facilitar a visualização das fórmulas, não sendo necessário excluir quaisquer colunas ou linhas durante a execução do procedimento). Embora o Excel demande uma licença para uso, atualmente é acessível na maioria dos computadores, e costuma ser o mais difundido entre os usuários, motivo pelo qual as fórmulas apresentadas visam o uso do Excel. Não obstante, programas de planilhas eletrônicas com funcionalidades equivalentes também estão disponíveis de forma gratuita, tais como Libre Office Calc®, WPS Office Spreadsheet® e Zoho Sheet®.

Conforme mencionado anteriormente, o rumo do polo será igual à direção do plano somada 270°, de modo que a fórmula inserida na coluna F já prevê os casos em que essa soma seria superior a 360°, retornando apenas números entre 0 e 360 (Tabela 3). O cálculo do mergulho do polo é mais simples, por se tratar de um ângulo complementar ao mergulho do plano.

6.3 Cosseno diretor

Uma vez que os principais dados disponíveis a respeito da linha de levantamento e das estruturas são dados angulares, o ângulo α_{polo} entre a linha e os polos é calculado através de cossenos diretores (ou cossenos de direção ou cossenos direcionais), os quais são definidos como os cossenos dos ângulos (θ_x , θ_y e θ_z) entre o vetor e os três eixos coordenados (Figura 9). Analogamente, eles são as contribuições de cada componente da base para um vetor unitário nessa direção.



| Cossenos diretores | Atitude da linha | T: direção; P: mergulho |
|---------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $Q_x = \cos \theta_x = \cos P \cdot \cos T$ | Ângulo que a linha inclinada faz com: | abscissa: θ_x ($x^+ \rightarrow$ norte) |
| $Q_y = \cos \theta_y = \cos P \cdot \sin T$ | | ordenada: θ_y ($y^+ \rightarrow$ leste) |
| $Q_z = \cos \theta_z = \sin P$ | | nadir: θ_z ($z^+ \rightarrow$ abaixo) |

FIGURA 9 – Representação do cosseno diretor. Adaptado de ROY (2011).

Em um sistema de coordenadas cartesianas, um vetor unitário que represente o polo de um plano formará os ângulos θ_x , θ_y e θ_z com os eixos de coordenadas (Figura 9), sendo possível calcular os respectivos cossenos diretores Q_x , Q_y e Q_z . A raiz quadrada da soma dos quadrados dos cossenos diretores deve ser igual a 1. O cosseno do ângulo teta (θ) entre dois vetores pode então ser obtido através do produto escalar entre eles (Eq. 3).

$$\cos \theta = [A \cdot B] = [(Ax \cdot Bx) + (Ay \cdot By) + (Az \cdot Bz)] \quad \{\text{Eq. 3}\}$$

onde θ [graus] é o ângulo entre os vetores A e B; e A_x , A_y e A_z e B_x , B_y e B_z são os cossenos diretores Q_x , Q_y e Q_z dos vetores A e B, respectivamente. Esses valores são calculados individualmente na planilha eletrônica, a fim de minimizar erros (Tabela 4).

TABELA 3 – Fórmulas de cálculo em planilha eletrônica do rumo e mergulho dos polos das estruturas (colunas F e G).

| Coluna/Linha | B | C | D | F | G |
|--------------|-------------------|---------------|----------|-------------------------|--------------------|
| 2 | Tipo de estrutura | Direção (rhr) | Mergulho | Rumo (do polo) | Mergulho (do polo) |
| 3 | Scanline | - | - | 78 | 0 |
| 4 | Fratura | 153 | 46 | =SE(C4<90;C4+270;C4-90) | =90-D4 |
| 5 | Fratura | 325 | 67 | =SE(C5<90;C5+270;C5-90) | =90-D5 |
| 6 | Fratura | 122 | 51 | =SE(C6<90;C6+270;C6-90) | =90-D6 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| □ | Fratura | 114 | 49 | =SE(C□<90;C□+270;C□-90) | =90-D□ |

6.4 Obtenção do ângulo alfa

Uma vez calculado o cosseno de alfa polo (cos α_{polo}), aplica-se a fórmula arco cosseno na planilha eletrônica para obtenção do valor do ângulo correspondente (Tabela 4, coluna L).

O uso das expressões “pi()/180” e “180/pi()” nos cálculos da planilha eletrônica (Tabela 4) deve-se ao *software* realizar os cálculos em radianos e os dados inseridos serem em graus, permitindo realizar as transformações necessárias (“pi()” = π).

6.5 Atribuição de peso às fraturas e definição da zona cega

Após calculado o valor de α_{polo} para cada estrutura, atribui-se o peso igual a $1/\text{sen}(90-\alpha_{\text{polo}})$ a cada uma delas (Tabela 5). Este peso indica quantas estruturas de uma determinada orientação deveriam ser observadas ao longo de uma linha de levantamento do mesmo comprimento que a usada na pesquisa, mas normal ao plano da estrutura. Uma vez que a maioria dos programas para projeção estereográfica apenas permite a atribuição de pesos inteiros às estruturas (ou seja, uma estrutura não pode ser plotada 1,5 vezes), comumente utiliza-se o peso padrão de $10/\text{sen}(90-\alpha_{\text{polo}})$ para as projeções (pois uma estrutura pode ser plotada 15 vezes) (Tabela 5, coluna N).

Uma zona cega de $\pm 20^\circ$ (ou 10° ou 30° , conforme o procedimento adotado) é traçada ao redor da linha de levantamento e indicada na projeção estereográfica, pois a estimativa do espaçamento das fraturas nessa zona torna-se progressivamente mais imprecisa (TERZAGHI 1965). Para as fraturas de zona cega, atribui-se o peso igual a zero (Tabela 5, coluna M), ou seja, elas são desconsideradas.

É importante ressaltar que o ângulo α_{polo} calculado na tabela 4 representa o ângulo entre a *scanline* e o polo da estrutura, de modo que os polos que formem 70° ou mais com a linha de levantamento estarão na zona cega, pois representam as estruturas que formam 20° ou menos com a *scanline* (Tabela 5, coluna M).

6.6 Projeção estereográfica das fraturas com peso atribuído

O passo seguinte é a projeção estereográfica das estruturas considerando-se o peso atribuído na etapa anterior – isto é, uma estrutura que recebeu o peso igual a 12, deve ser plotada 12 vezes no estereograma. Deve-se optar pela projeção polar, para que possa ser elaborado o gráfico de densidade do estereograma (Figura 10). Este permite avaliar a distribuição das orientações dos polos das estruturas, em

que concentrações de polos são indicativas de uma orientação mais recorrente que as demais. Conforme descrito na Introdução, há diversos programas de projeção estereográfica de uso gratuito, os quais podem ser utilizados para esta etapa. Por se tratar de muitos pontos, é preferível o uso de *software* à elaboração manual do estereograma de densidade. Projeções planar e polar, e diagramas de densidade são funções básicas que devem estar disponíveis nesses programas.

Para projetar cada estrutura um número igual a $10/\text{sen}(90-\alpha_{\text{polo}})$ de vezes, na maioria dos programas gratuitos de projeção estereográfica é preciso inserir cada valor $10/\text{sen}(90-\alpha_{\text{polo}})$ vezes. O Anexo 1 apresenta uma solução para preparação do arquivo para projeção, repetindo automaticamente os valores de uma célula na planilha eletrônica.

6.7 Definição das famílias de fraturas mais relevantes na linha de levantamento através da análise do estereograma

Com o estereograma de densidade com os dados corrigidos (i.e., com pesos atribuídos), geralmente é possível identificar uma ou mais concentrações de estruturas, que indicam as famílias de fraturas mais importantes naquela linha de levantamento (Figura 10b). As estruturas com orientações próximas, que definem um grupo/aglomerado claro no diagrama de densidade, são consideradas como parte da mesma família de fraturas.

É possível também determinar as fraturas de uma mesma família numericamente, isto é, todas as fraturas cujos polos formem entre si ângulos iguais ou inferiores a 20° (ou outro valor, conforme o caso em estudo) podem ser consideradas parte da mesma família. Determina-se então a orientação do polo médio de cada concentração observada, que serão atribuídos como a orientação média daquelas famílias de fraturas. A orientação do polo médio de uma família pode ser obtida diretamente no estereograma (programas de projeção em geral indicam a medida de qualquer ponto do estereograma ao se posicionar o cursor sobre ele). Essa forma é uma aproximação visual para obtenção do polo médio da família de fraturas, facilitada pelo uso de *software* de projeção. A orientação desse polo também pode ser obtida através da comparação de cada ponto (projeção polar de cada fratura) com seus vizinhos, ajustando o ponto médio à concentração.

Uma vez determinada a orientação do polo médio de uma família de fraturas, deve-se inserir essa informação ao final da planilha – rumo e mergulho do polo, obtidos no estereograma (Tabela

TABELA 4 – Cálculo do cosseno diretor em planilha eletrônica e do ângulo α_{polo} entre a *scanline* e os polos das estruturas (colunas H a L).

| Coluna/ Linha | B | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------|-------------------|------|----------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | | Cosseno diretor | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | Rumo | Mergulho | Qx | Qy | Qz | $\cos\alpha_{polo}$ | α_{polo} |
| 3 | <i>Scanline</i> | 78 | 0 | $=\text{COS}(G3*\text{PI}/180)*\text{COS}(F3*\text{PI}/180)$ | $=\text{COS}(G3*\text{PI}/180)*\text{SEN}(F3*\text{PI}/180)$ | $=\text{SEN}(G3*\text{PI}/180)$ | - | - |
| 4 | Fratura | | | $=\text{COS}(G4*\text{PI}/180)*\text{COS}(F4*\text{PI}/180)$ | $=\text{COS}(G4*\text{PI}/180)*\text{SEN}(F4*\text{PI}/180)$ | $=\text{SEN}(G4*\text{PI}/180)$ | $=H3*H4+I3*I4+J3*J4$ | $=(\text{ACOS}(\text{ABS}(K4)))*(180/\text{PI})$ |
| 5 | Fratura | | | $=\text{COS}(G5*\text{PI}/180)*\text{COS}(F5*\text{PI}/180)$ | $=\text{COS}(G5*\text{PI}/180)*\text{SEN}(F5*\text{PI}/180)$ | $=\text{SEN}(G5*\text{PI}/180)$ | $=H3*H5+I3*I5+J3*J5$ | $=(\text{ACOS}(\text{ABS}(K5)))*(180/\text{PI})$ |
| 6 | Fratura | | | $=\text{COS}(G6*\text{PI}/180)*\text{COS}(F6*\text{PI}/180)$ | $=\text{COS}(G6*\text{PI}/180)*\text{SEN}(F6*\text{PI}/180)$ | $=\text{SEN}(G6*\text{PI}/180)$ | $=H3*H6+I3*I6+J3*J6$ | $=(\text{ACOS}(\text{ABS}(K6)))*(180/\text{PI})$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| □ | Fratura | | | $=\text{COS}(G*\text{PI}/180)*\text{COS}(F*\text{PI}/180)$ | $=\text{COS}(G*\text{PI}/180)*\text{SEN}(F*\text{PI}/180)$ | $=\text{SEN}(G*\text{PI}/180)$ | $=H3*H\Box+I3*I\Box+J3*J\Box$ | $=(\text{ACOS}(\text{ABS}(K\Box)))*(180/\text{PI})$ |

TABELA 5 – Atribuição de peso às estruturas (colunas M e N).

| Coluna/ Linha | B | L | M | N | O |
|------------------|-------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | Cosseno diretor | | Peso da fratura | |
| 2 | Tipo de estrutura | α_{polo} | Peso (%) | Peso padrão (10*%) | Nº equivalente de fraturas |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | - | - | - |
| 4 | Fratura | | $=\text{SE}(L4>=70;0;(1/(\text{SEN}((90-L4)*\text{PI}/180))))$ | $=M4*10$ | $=\text{SOMA}(M4;M\Box)$ |
| 5 | Fratura | | $=\text{SE}(L5>=70;0;(1/(\text{SEN}((90-L5)*\text{PI}/180))))$ | $=M5*10$ | - |
| 6 | Fratura | | $=\text{SE}(L6>=70;0;(1/(\text{SEN}((90-L6)*\text{PI}/180))))$ | $=M6*10$ | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | - |
| □ | Fratura | | $=\text{SE}(L\Box>=70;0;(1/(\text{SEN}((90-L\Box)*\text{PI}/180))))$ | $=M\Box*10$ | - |

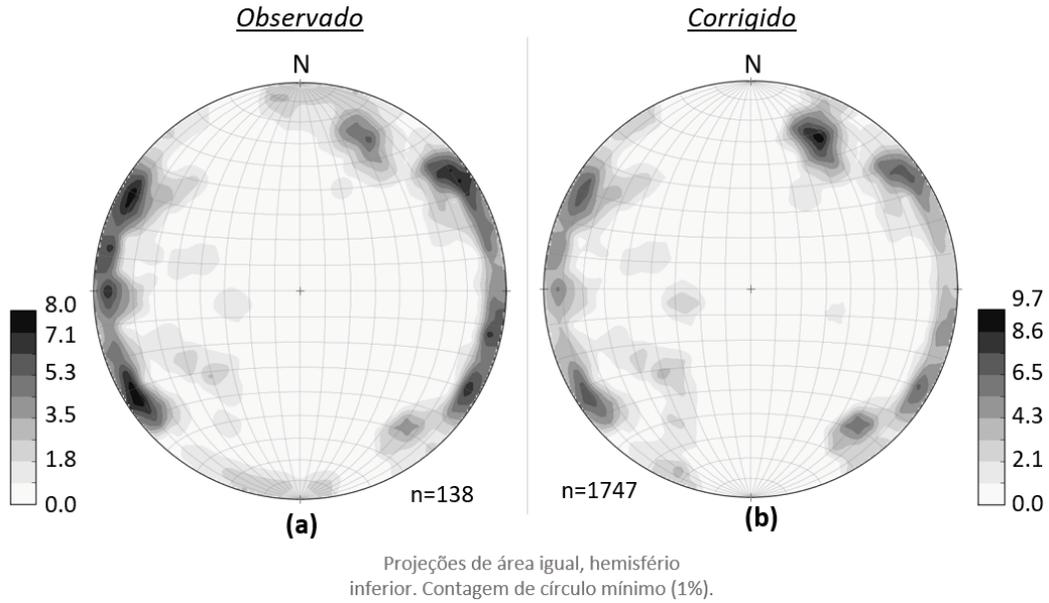


FIGURA 10 – Comparação dos diagramas de densidade da projeção polar de fraturas (a) observadas e (b) corrigidas para o viés de orientação, a partir de uma mesma *scanline* (orientação N086/00). Observar a mudança das concentrações de polos após a aplicação da correção de Terzaghi. Projeções de igual-área, hemisfério inferior. Adaptado de PINO (2012).

6). Isso permitirá o cálculo do cosseno diretor e do ângulo α_{polo} para este polo, os quais serão utilizados para a determinação das estruturas que pertencem a essa família, conforme descrito no próximo item.

6.8 Cálculo do espaçamento corrigido das famílias de fraturas

A orientação da família de fraturas, obtida na etapa anterior, é utilizada para caracterizar o espaçamento das fraturas. Esta análise deve ser realizada para cada família separadamente.

Primeiro, é necessário verificar quais as fraturas observadas na linha de levantamento fazem parte da família identificada visualmente no estereograma de densidade. Através dos cossenos diretores, calcula-se o ângulo γ entre o polo da família de fraturas e cada uma das fraturas observadas através da Eq. 3 (Tabela 7). Neste trabalho, assume-se que uma fratura faz parte de determinada família para valores de γ iguais ou inferiores a 20° . Não obstante, se os polos médios de duas ou mais famílias estiverem próximos, é possível que uma mesma fratura seja atribuída a mais de uma família ao se considerar apenas o critério do ângulo γ . Dessa forma, recomenda-se realizar também uma análise visual do estereograma (ou a comparação dos polos medidos) para a classificação das fraturas nas zonas em que ocorre sobreposição de famílias.

Uma vez determinado o número de fraturas pertencentes à família (soma dos pesos atribuídos a cada estrutura no subitem 6.5, de $1/\text{sen}(90-\alpha_{\text{polo}})$ para cada uma), o espaçamento médio aparente da família de fraturas é calculado pela Eq. 4 (Tabela 7, coluna S).

$$W_{ap} = \frac{L}{\sum 1/\text{sen}(90 - \alpha_{\text{polo}})} \quad \{\text{Eq. 4}\}$$

onde W_{ap} [L] é o espaçamento médio aparente da família de fraturas, $1/\text{sen}(90-\alpha_{\text{polo}})$ é o número de vezes que cada fratura seria idealmente observada naquela linha de levantamento, α_{polo} [graus] é o ângulo entre o polo de cada fratura e a linha de levantamento, e L [L] é o comprimento total da linha de levantamento.

O espaçamento real da família de fraturas é então determinado através da Eq. 5 (Tabela 7, coluna T).

$$W_{real} = |W_{ap} \cdot \cos \alpha_p| \quad \{\text{Eq. 5}\}$$

onde W_{real} [L] é o espaçamento real da família de fraturas, W_{ap} [L] é o espaçamento aparente, e α_p [graus] é o ângulo entre o polo médio da família de fraturas e a *scanline*.

A distinção entre os espaçamentos aparente e real é ilustrada na figura 8. Embora seja um conceito simples, é essencial compreender a diferença entre as duas medidas, uma vez que esse

TABELA 6 – Inserção da orientação e cálculo do ângulo alfa do polo médio ("Polo P1", na última linha, identificado em estereograma) de uma família de fraturas.

| Coluna/ Linha | B | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------|-------------------|------|----------|----------------------------------------|----------------------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | Cosseno diretor | | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | Rumo | Mergulho | Qx | Qy | Qz | cos α_{polo} | α_{polo} |
| 3 | Scanline | | | | | | | |
| 4 | Fratura | | | | | | | |
| 5 | Fratura | | | | | | | |
| 6 | Fratura | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| □ | Fratura | | | | | | | |
| □□ | Polo P1 | 125 | 55 | =COS(G□*PI()/180)* COS(F□*PI()/180) | =COS(G□*PI()/180)* SEN(F□*PI()/180) | =SEN(G□*PI()/180) | =HS3*H□+HS3* I□+JS3*J□ | =(ACOS(ABS(K□)))* (180/PI()) |

TABELA 7 – Definição das fraturas pertencentes a uma família de polo médio P1 (colunas P a R) e cálculo do espaçamento real das fraturas dessa família (colunas S e T).

| Coluna/ Linha | B | P | Q | R | S | T |
|------------------|-------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | Fraturas pertencentes à família de polo P1 | | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | cos(γ 1) | γ 1 | γ 1 < 20° | Wap | Wreal |
| 3 | Scanline | - | - | - | - | - |
| 4 | Fratura | =HS(□)*H4+IS(□)* I4+JS(□)*J4 | =(ACOS(ABS(P4)))* (180/PI()) | =SE(Q4 <= 20; N4; 0) | - | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| □ | Fratura | =HS(□)*H□+IS(□)* I□+JS(□)*J□ | =(ACOS(ABS(P□)))* (180/PI()) | =SE(Q□ <= 20; N□; 0) | - | - |
| □□ | Polo P1 | - | - | - | =(E□*10)/SOMA(R4;R□) | =ABS((S□)*COS(L□))* PI()/180) |

parâmetro afeta interpretações acerca do sistema de fraturas e, conseqüentemente, do fluxo da água subterrânea de um meio fraturado, da estabilidade de taludes, da migração de óleo, entre outros.

Uma vez que a variável W corresponde a espaçamentos médios, é interessante avaliar a distribuição das fraturas de determinada família. Essa análise pode ser feita visualmente, com o auxílio de desenhos esquemáticos.

Conceitualmente, desenha-se uma linha A paralela à orientação principal do polo da família de fraturas, ou seja, perpendicular ao plano das fraturas (Figura 11). Assume-se que os valores de distância na linha A aumentem no mesmo sentido que na *scanline* (Figura 11). Em seguida, a posição virtual das fraturas é determinada ao longo da linha A, através do prolongamento do traço das fraturas (Figura 11). Por fim, através da avaliação visual da posição virtual das fraturas sobre a linha A, é possível indicar o tipo de distribuição de espaçamento. Quatro dos tipos mais comuns são (Figura 12): (i)

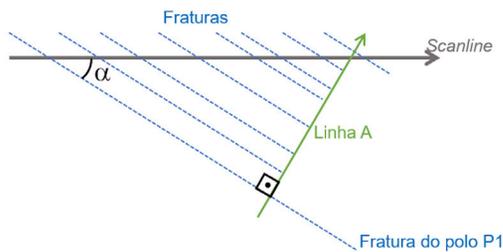


FIGURA 11 – Projeção da posição das fraturas observadas na linha de levantamento em linha de projeção A paralela ao polo P1 da família de fraturas (obtido com a correção de viés). Adaptado de PINO (2012).

regular; (ii) regularmente variável; (iii) regularmente concentrado; (iv) aleatório. Alguns autores (WOJTAL 1989, PEACOCK *et al.* 2003) afirmam que os casos (ii) a (iv) devem ser subdivididos até que possam ser descritos como o caso (i).

A posição das estruturas sobre a linha A (Figura 11) pode ser determinada em planilhas eletrônicas (Tabela 8) e plotada em um gráfico (Figura 12). Emprega-se uma relação trigonométrica para definir a posição da fratura sobre a linha A (Eq. 6, Tabela 8).

$$d_n = l_n * \text{sen}(\alpha) \quad \{\text{Eq. 6}\}$$

onde α [graus] é o ângulo entre a família de fraturas e a *scanline*, l_n [L] é a posição da fratura n sobre a *scanline*, e d_n [L] é a posição da fratura n sobre a linha A.

Por fim, as posições obtidas na coluna U (Tabela 8) podem ser plotadas e estudadas como na figura 12.

7 EXEMPLOS DE LEVANTAMENTOS REAIS

Neste item são apresentados dois exemplos a partir de dados reais de levantamentos estruturais. O primeiro caso refere-se a um levantamento realizado em exposições subverticais de afloramentos de anortosito em Québec, Canadá (PINO 2012); o segundo, ao estudo conduzido em perfurações e poços profundos de paredes abertas em rochas gnáissicas em São Paulo, Brasil (PINO 2019). As etapas são apresentadas conforme a descrição dos cálculos do item 6. O Anexo 2 apresenta as planilhas completas utilizadas nos exemplos, com valores numéricos e fórmulas de cada célula para ambos os casos.

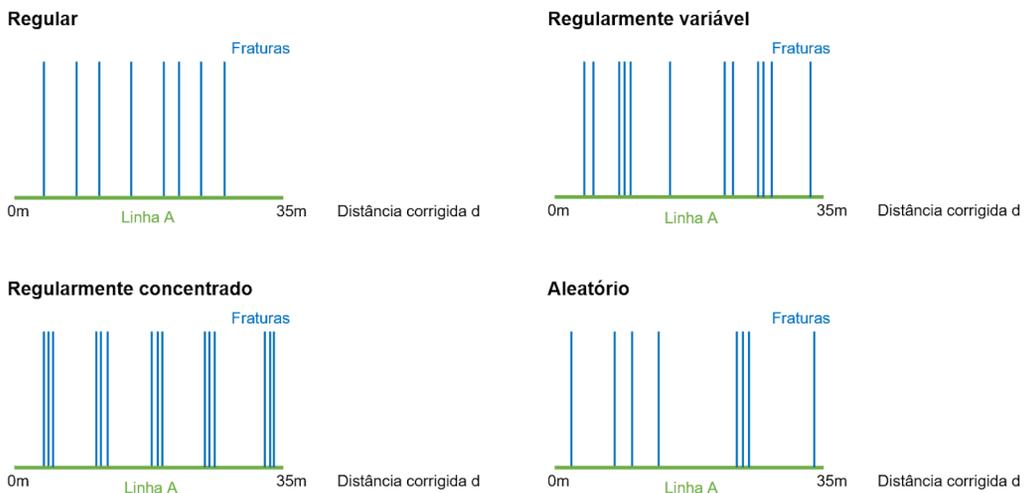


FIGURA 12 – Quatro principais tipos de distribuição de fraturas em uma família. Traduzido de PINO (2012).

TABELA 8 – Cálculo da distância real das fraturas sobre uma linha A (coluna U).

| Coluna/ Linha | B | E | F | G | L | U |
|------------------|-------------------|----------------------------|------|-------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | | Dados de fraturas | | | <i>Cos. dir.</i> | |
| 2 | Tipo de estrutura | Posição na <i>scanline</i> | Rumo | Merg. | α_{polo} | dn (m) |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | | | | - |
| 4 | Fratura | | | | | $=\text{SEN}((90-\text{L}\$(\square\square))*\text{PI}/180)*(E4)$ |
| 5 | Fratura | | | | | $=\text{SEN}((90-\text{L}\$(\square\square))*\text{PI}/180)*(E5)$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| \square | Fratura | | | | | $=\text{SEN}((90-\text{L}\$(\square\square))*\text{PI}/180)*(E\square\square)$ |
| $\square\square$ | Polo P1 | | | | | - |

Note-se que α_{polo} é o ângulo complementar de α .

7.1 Exemplo I: linha de levantamento sub-horizontal em afloramento subvertical

Neste exemplo, são apresentados dados reais de uma linha de levantamento sub-horizontal, realizada em afloramento subvertical de anortosito na província de Québec, Canadá (Figura 13) (PINO 2012). A linha de levantamento apresenta orientação N005/00. Os dados apresentados foram obtidos através da medida direta da orientação das estruturas sobre o afloramento, com o emprego de uma bússola tipo Brunton (PINO 2012). A primeira etapa foi tabelar as informações coletadas e calcular o rumo e mergulho dos polos das estruturas (Tabela 9).

Em seguida, foram calculados os termos do cosseno diretor para cada estrutura, a partir da Eq. 3 (Tabela 10). Isso permitiu obter o ângulo α_{polo} entre o polo de cada estrutura e a linha de levantamento. Observe-se que o valor do termo Qz do cosseno diretor da *scanline* é igual a zero, por se tratar de uma linha com mergulho nulo (Tabela 10).

A partir do ângulo α_{polo} , calculou-se o peso a ser atribuído a cada estrutura (Tabela 11), para sua posterior projeção estereográfica (Figura 14).

A partir do gráfico de densidade com os dados corrigidos (Figura 14b), foi possível identificar três concentrações principais de estruturas naquela linha de levantamento. Considere-se o exemplo da família P1 (Figura 14b), cujo polo médio tem orientação N191/01, valor obtido diretamente sobre o estereograma utilizando a maior densidade de fraturas dessa família após a correção. Esse dado é inserido na linha seguinte ao último dado de fratura da planilha (rumo e mergulho de um polo), sendo então calculados os valores de cosseno diretor e ângulo α_{polo} para a família do polo P1 (Tabela 12).

A partir do cálculo de γ , ângulo entre o polo da família de fraturas e cada uma das fraturas ob-

servadas, utilizando os cossenos diretores, foi possível determinar as estruturas pertencentes a família de polo P1, ou seja, as fraturas cujos polos formavam ângulos iguais ou inferiores a 20° com o polo médio P1 (Tabela 13, colunas P e R). Em seguida, calcularam-se os espaçamentos aparente e real das estruturas dessa família a partir das Eqs. 4 e 5, respectivamente (Tabela 13, colunas S e T).

A etapa final, embora raramente realizada, refere-se à distribuição dos espaçamentos das fraturas de determinada família. No caso da família do polo P1 apresentada acima, as distâncias corrigidas foram calculadas na tabela 14, de acordo com a Eq. 6. Assim, obteve-se o esquema da figura 15, indicando uma distribuição aleatória.

Ao final, o procedimento da tabela 12 é repetido para os outros polos identificados, P2 e P3. Como resultado, nota-se que, na correção de viés, a família do polo P1, embora seja aproximadamente perpendicular à *scanline*, não recebe peso muito maior que as famílias de polos P2 e P3 (obíquas à *scanline*), pois estas famílias também são muito importantes na região em que foram estudadas, conforme indicado por sua densidade observada na linha de levantamento (Figura 14a) e em outras linhas do estudo regional do qual esse exemplo foi extraído (PINO 2012). Assim, reforça-se a importância de serem efetuadas linhas de levantamento em diversas orientações, de modo a garantir não só uma amostragem representativa das famílias de fraturas, mas também um funcionamento adequado da correção de viés.

7.2 Exemplo II: linha de levantamento vertical em perfurações e/ou poços de produção

Este segundo exemplo refere-se a uma linha de levantamento vertical, correspondente a uma perfuração ou poço tubular de parede aberta em ro-

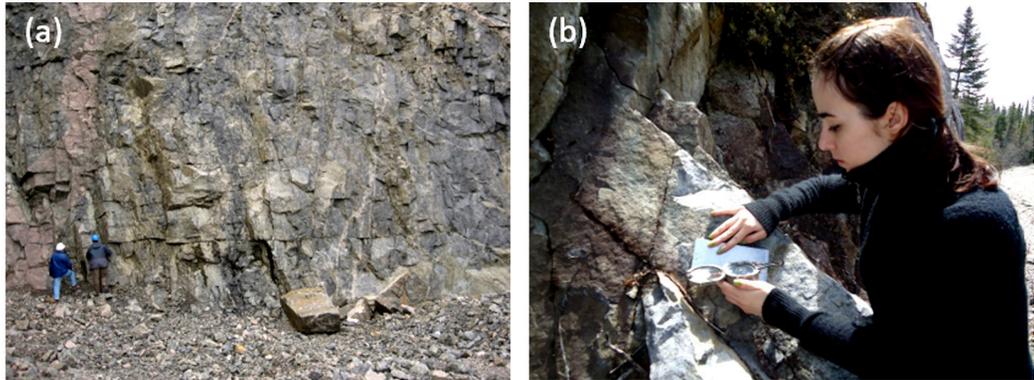


FIGURA 13 – Afloramentos de anortosito. (a) Ocorrência de fraturas sub-horizontais e subverticais. (b) Medida de fratura subvertical em *scanline*. Fonte: PINO (2012).

TABELA 9 – Dados de linha de levantamento em afloramento de anortosito (colunas A a G). Fórmulas na tabela 3. Fonte do levantamento estrutural: PINO (2012).

| Coluna/ Linha | A | B | C | D | E | F | G |
|------------------|-------------------|-------------------|---------------|----------|--------------------------------|----------------|--------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | | | | |
| 2 | Nº estrutura | Tipo de estrutura | Direção (rhr) | Mergulho | Posição na <i>scanline</i> (m) | Rumo (do polo) | Mergulho (do polo) |
| 3 | - | <i>Scanline</i> | - | - | - | 5 | 0 |
| 4 | 1 | Fratura | 84 | 67 | 0,07 | 354 | 23 |
| 5 | 2 | Fratura | 75 | 74 | 0,23 | 345 | 16 |
| 6 | 3 | Fratura | 140 | 87 | 0,38 | 50 | 3 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 47 | 45 | Fratura | 275 | 84 | 23,48 | 185 | 6 |
| 48 | 46 | Fratura | 108 | 83 | 23,55 | 18 | 7 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 116 | 113 | Fratura | 294 | 71 | 43,54 | 204 | 19 |

TABELA 10 – Cálculo do cosseno diretor em planilha eletrônica (colunas H a L). Fórmulas na tabela 4.

| Coluna/ Linha | B | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------|-------------------|------|----------|-----------------|---------|--------|----------------------------|------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | Cosseno diretor | | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | Rumo | Mergulho | Qx | Qy | Qz | $\cos\alpha_{\text{polo}}$ | α_{polo} |
| 3 | <i>Scanline</i> | 5 | 0 | 0,9962 | 0,0872 | 0 | - | - |
| 4 | Fratura | 354 | 23 | 0,9155 | -0,0962 | 0,3907 | 0,9036 | 25,3656 |
| 5 | Fratura | 345 | 16 | 0,9285 | -0,2488 | 0,2756 | 0,9033 | 25,4060 |
| 6 | Fratura | 50 | 3 | 0,6419 | 0,76499 | 0,0523 | 0,7061 | 45,0785 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 47 | Fratura | 185 | 6 | -0,9907 | -0,0867 | 0,1045 | -0,9945 | 6,0000 |
| 48 | Fratura | 18 | 7 | 0,9440 | 0,3067 | 0,1219 | 0,9671 | 14,7362 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 116 | Fratura | 204 | 19 | -0,8638 | -0,3846 | 0,3256 | -0,8940 | 26,6190 |

TABELA 11 – Atribuição de peso às estruturas (colunas M e N). Fórmulas na tabela 5.

| Coluna/ Linha | B | L | M | N | O |
|------------------|-------------------|------------------------|-----------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | Cosseno diretor | Peso da fratura | | |
| 2 | Tipo de estrutura | α_{polo} | Peso (%) | Peso padrão (10*%) | Nº equivalente de fraturas |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | - | - | - |
| 4 | Fratura | 25,3656 | 1,107 | 11 | 1591 |
| 5 | Fratura | 25,4060 | 1,107 | 11 | |
| 6 | Fratura | 45,0785 | 1,416 | 14 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | |
| 47 | Fratura | 6,0000 | 1,006 | 10 | |
| 48 | Fratura | 14,7362 | 1,034 | 10 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | |
| 116 | Fratura | 26,6190 | 1,119 | 11 | |

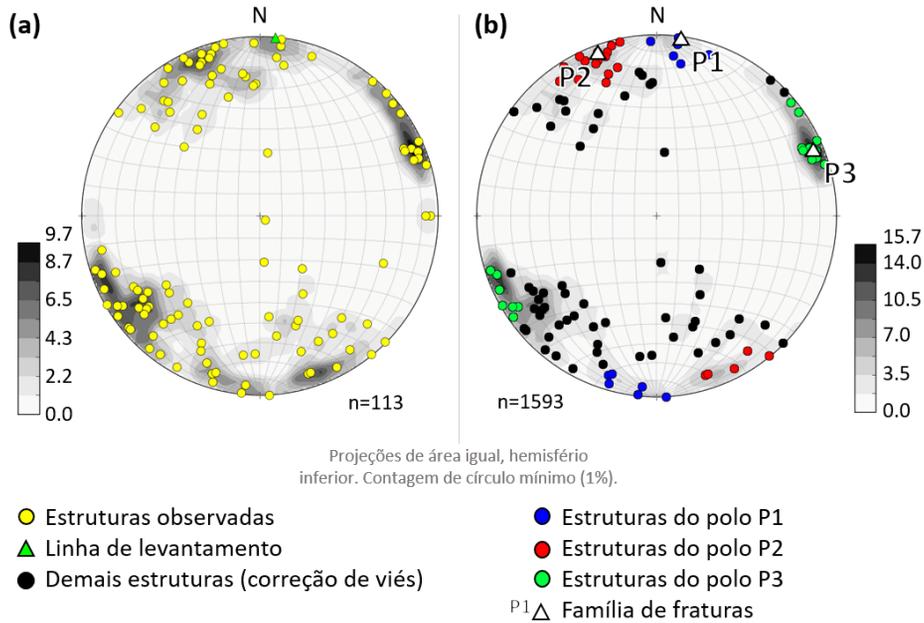


FIGURA 14 – Comparação dos diagramas de densidade da projeção polar de fraturas (a) observadas e (b) corrigidas para o viés de orientação, a partir da *scanline* N005/00. Observar a mudança das concentrações de polos após a aplicação da correção de Terzaghi e a identificação das famílias de polos P1 a P3. Projeções de igual-área, hemisfério inferior, malhas de 10°. Fonte do levantamento estrutural: PINO (2012).

TABELA 12 – Inserção (última linha, colunas B, F e G) e cálculo (última linha, colunas G a L) das informações do polo médio P1. Fórmulas na tabela 6.

| Coluna/ Linha | B | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------|-------------------|------|----------|-----------------|---------|--------|----------------------------|------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | Cosseno diretor | | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | Rumo | Mergulho | Qx | Qy | Qz | $\cos\alpha_{\text{polo}}$ | α_{polo} |
| 3 | <i>Scanline</i> | | | | | | - | - |
| 4 | Fratura | | | | | | | |
| 5 | Fratura | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 116 | Fratura | | | | | | | |
| 117 | Polo P1 | 191 | 1 | -0,9815 | -0,1908 | 0,0174 | -0,9944 | 6,0825 |

TABELA 13 – Cálculo das fraturas pertencentes à família do polo P1 (colunas P a R) e de seu espaçamento real (colunas S e T). Fórmulas na tabela 7.

| Coluna/ Linha | B | P | Q | R | S | T |
|------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------|-----------------------|-------------|-------|
| 1 | Dados de fraturas | Fraturas pertencentes à família de polo P1 | | | Espaçamento | |
| 2 | Tipo de estrutura | $\cos(\gamma_1)$ | γ_1 | $\gamma_1 < 20^\circ$ | Wap | Wreal |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | - | - | - | - |
| 4 | Fratura | 0,937845 | 20,30724 | 0 | - | - |
| 5 | Fratura | 0,985364 | 9,814696 | 0 | ... | ... |
| 6 | Fratura | 0,361587 | 68,80228 | 0 | - | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 47 | Fratura | 0,990747 | 7,800172 | 96 | - | - |
| 48 | Fratura | -0,982871 | 10,620053 | 39 | - | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 116 | Fratura | -0,64668 | 49,70845 | 0 | - | - |
| 117 | Polo P1 | - | - | - | 3,03 | 3,01 |

TABELA 14 – Cálculo da distribuição das fraturas da família do polo P1 ao longo da linha de levantamento (coluna U). Fórmulas na tabela 8.

| Coluna/ Linha | B | E | F | G | L | U | |
|------------------|-------------------|----------------------------|------|----------|------------------------|-----------|--|
| 1 | | Dados de fraturas | | | | Cos. dir. | |
| 2 | Tipo de estrutura | Posição na <i>scanline</i> | Rumo | Mergulho | α_{polo} | dn (m) | |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | 5 | 0 | - | - | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 47 | Fratura | 23,48 | 185 | 6 | 6,0000 | 23,348 | |
| 48 | Fratura | 23,55 | 18 | 7 | 14,7362 | 23,417 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 117 | Polo P1 | - | 341 | 7 | 24,9419 | - | |

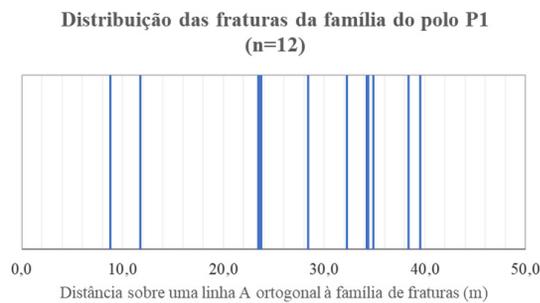


FIGURA 15 – Esquema das estruturas da família do polo P1 (em azul), indicando uma distribuição aleatória.

chas gnáissicas em São Paulo, Brasil (Figura 16). Dessa forma, a orientação da *scanline* é N000/90 (Tabela 15) – desde que o mergulho seja de 90°, não importa a direção escolhida para a linha de levantamento neste caso (a projeção da *scanline* cairá sobre o mesmo ponto no estereograma para uma linha vertical). Os dados de fraturas apresentados foram obtidos a partir da interpretação de perfis geofísicos de imageamento acústico e óptico (PINO 2019). Primeiramente, as informações da *scanline* e das estruturas foram inseridas na tabela, e foram calculados rumo e mergulho dos polos das estruturas (Tabela 15).

Em seguida, foram calculados os termos do cosseno diretor a partir da Eq. 3 (Tabela 16). Isso permitiu obter o ângulo α_{polo} entre o polo de cada estrutura e a linha de levantamento. Observe-se que o valor do termo Q_y do cosseno diretor é igual a zero para esta *scanline*, por se tratar de uma linha vertical (Tabela 16).

A partir do ângulo α_{polo} , calculou-se o peso a ser atribuído a cada estrutura (Tabela 17), para sua posterior projeção estereográfica (Figura 17).

A partir do gráfico de densidade com os dados corrigidos (Figura 17b), foi possível identificar duas concentrações de estruturas, indicativas de famílias de fraturas mais importantes naquela

linha de levantamento. Considere-se o exemplo da família do polo médio P5 (Figura 17b), cujo polo tem orientação média N334/62, valor obtido diretamente sobre o estereograma. Esse dado é inserido na linha seguinte ao último dado de fratura da planilha (rumo e mergulho de um polo), sendo então calculados os valores de cosseno diretor e ângulo α_{polo} para a família do polo P5 (Tabela 18).

A partir dos cossenos diretores do polo médio da família do polo P5, foi possível determinar as estruturas pertencentes a ela, ou seja, as fraturas cujos polos formavam ângulos iguais ou inferiores a 20° com o polo P5 (Tabela 19, colunas P a R). Em seguida, calculou-se o espaçamento aparente (Eq. 4) e real (Eq. 5) das estruturas dessa família (Tabela 19, colunas S e T).

Na etapa final, determina-se a distribuição das fraturas da família. No caso da família do polo P5, as distâncias corrigidas foram calculadas na tabela 20, de acordo com a figura 17 e a Eq. 6. Assim, obteve-se o esquema da figura 18, indicando uma distribuição regularmente variável.

Ao final, o procedimento a partir da tabela 18 é repetido para o outro polo identificado, P4.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de linha de levantamento estrutural é bastante vantajoso por ser relativamente rápido e permitir obter diversas informações a respeito das estruturas que interceptam a linha (orientação, comprimento, rugosidade, preenchimentos, feições indicativas de circulação de água, etc.). O viés de orientação, associado ao levantamento estrutural em linha, pode ser resolvido através da correção de TERZAGHI (1965). O procedimento com planilhas eletrônicas aqui proposto facilita a execução dessa correção quando não há *software* específico disponível. Deve-se lembrar ainda que as observações feitas em *scanlines* são de fraturas em duas dimensões (traços de fraturas), e que se



← Profundidade →

FIGURA 16 – Testemunhos de sondagem mostrando sequência de material alterado no topo do perfil (à direita da foto) para rocha sã em profundidade (à esquerda da foto). Fonte: PINO (2019).

TABELA 15 – Dados de *scanline* em perfuração vertical em rochas gnáissicas (colunas A a G). Fórmulas na tabela 3. Fonte do levantamento estrutural: PINO (2019).

| Coluna/ Linha | A | B | C | D | E | F | G |
|------------------|-------------------|-------------------|---------------|----------|--------------------------------|----------------|--------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | | | | |
| 2 | Nº estrutura | Tipo de estrutura | Direção (rhr) | Mergulho | Posição na <i>scanline</i> (m) | Rumo (do polo) | Mergulho (do polo) |
| 3 | - | <i>Scanline</i> | - | - | - | 0 | 90 |
| 4 | 1 | Fratura | 279 | 30 | 19,31 | 189 | 60 |
| 5 | 2 | Fratura | 297 | 21 | 20,00 | 207 | 69 |
| 6 | 3 | Fratura | 122 | 21 | 20,00 | 32 | 69 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 178 | 175 | Fratura | 179 | 28 | 58,86 | 89 | 62 |

TABELA 16 – Cálculo do cosseno diretor em planilha eletrônica (colunas H a L). Fórmulas na tabela 4.

| Coluna/ Linha | B | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------|-------------------|------|----------|-----------------|---------|--------|----------------------------|------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | Cosseno diretor | | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | Rumo | Mergulho | Qx | Qy | Qz | $\cos\alpha_{\text{polo}}$ | α_{polo} |
| 3 | <i>Scanline</i> | 0 | 90 | 6,13E-17 | 0 | 1 | - | - |
| 4 | Fratura | 189 | 60 | -0,4993 | -0,0785 | 0,8629 | 0,8629 | 30,36 |
| 5 | Fratura | 207 | 69 | -0,3206 | -0,1644 | 0,9328 | 0,9328 | 21,12 |
| 6 | Fratura | 32 | 69 | 0,3055 | 0,1910 | 0,9328 | 0,9328 | 21,12 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 178 | Fratura | 89 | 62 | 0,0060 | 0,4739 | 0,8806 | 0,8806 | 28,29 |

TABELA 17 – Atribuição de peso às estruturas (colunas M e N). Fórmulas na tabela 5.

| Coluna/ Linha | B | L | M | N | O |
|------------------|-------------------|------------------------|-----------------|-------------------|----------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | Cosseno diretor | Peso da fratura | | |
| 2 | Tipo de estrutura | α_{polo} | Peso (%) | Peso padrão (10%) | Nº equivalente de fraturas |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | - | - | - |
| 4 | Fratura | 30,36 | 1,159 | 12 | 2145 |
| 5 | Fratura | 21,12 | 1,072 | 11 | |
| 6 | Fratura | 21,12 | 1,072 | 11 | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 178 | Fratura | 28,29 | 1,136 | 11 | |

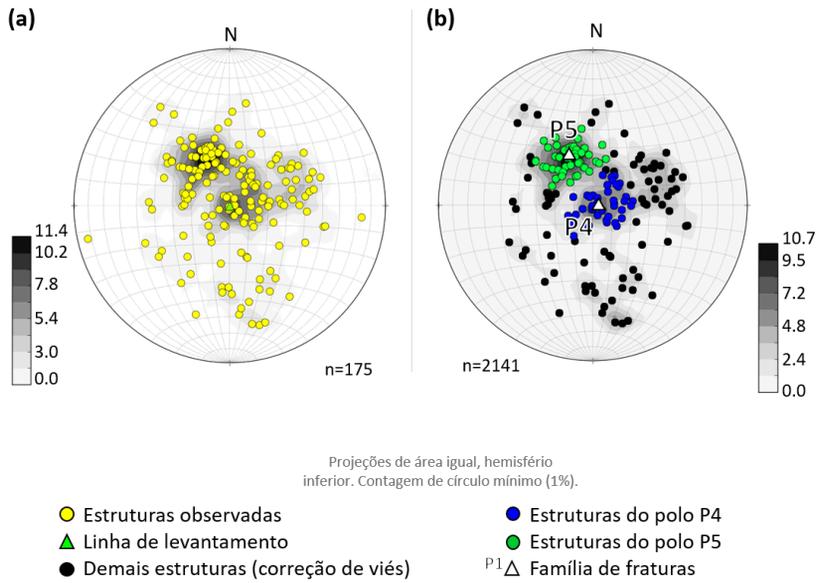


FIGURA 17 – Comparação dos diagramas de densidade da projeção polar de fraturas (a) observadas e (b) corrigidas para o viés de orientação, a partir da *scanline* N000/90. Observar a mudança das concentrações de polos após a aplicação da correção de Terzaghi e a identificação das famílias de polos P4 e P5. Projeções de igual-área, hemisfério inferior, malhas de 10°. Fonte do levantamento estrutural: PINO (2019).

TABELA 18 – Inserção (última linha, colunas B, F e G) e cálculo (última linha, colunas H a L) das informações do polo médio da família de polo P5. Fórmulas na tabela 6.

| Coluna/ Linha | B | F | G | H | I | J | K | L |
|------------------|-------------------|------|----------|-----------------|---------|--------|----------------------------|------------------------|
| 1 | Dados de fraturas | | | Cosseno diretor | | | | |
| 2 | Tipo de estrutura | Rumo | Mergulho | Qx | Qy | Qz | $\cos\alpha_{\text{polo}}$ | α_{polo} |
| 3 | <i>Scanline</i> | 0 | 90 | 6,13E-17 | 0 | 1 | - | - |
| 4 | Fratura | 189 | 60 | -0,4993 | -0,0785 | 0,8629 | 0,8629 | 30,36 |
| 5 | Fratura | 207 | 69 | -0,3206 | -0,1644 | 0,9328 | 0,9328 | 21,12 |
| 6 | Fratura | 32 | 69 | 0,3055 | 0,1910 | 0,9328 | 0,9328 | 21,12 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 178 | Fratura | 89 | 62 | 0,0060 | 0,4739 | 0,8806 | 0,8806 | 28,29 |
| 179 | Polo P5 | 334 | 62 | 0,4329 | -0,2149 | 0,8755 | 0,8755 | 28,9 |

TABELA 19 – Cálculo das fraturas pertencentes à família do polo P5 (colunas P a R) e de seu espaçamento real (colunas S e T). Fórmulas na tabela 7.

| Coluna/ Linha | B | P | Q | R | S | T |
|------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------|-----------------------|-------------|-------|
| 1 | Dados de fraturas | Fraturas pertencentes à família de polo P5 | | | Espaçamento | |
| 2 | Tipo de estrutura | $\cos(\gamma_1)$ | γ_1 | $\gamma_1 < 20^\circ$ | Wap | Wreal |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | - | - | - | - |
| 4 | Fratura | 0,8512 | 31,6573 | 0 | - | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 23 | Fratura | 0,9860 | 9,5950 | 10 | - | - |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 178 | Fratura | 0,9105 | 24,4202 | 0 | - | - |
| 179 | Polo P5 | - | - | - | 1,02 | 0,91 |

TABELA 20 – Cálculo da distribuição das fraturas da família do polo P5 ao longo da linha de levantamento (coluna U). Fórmulas na tabela 8.

| Coluna/ Linha | B | E | F | G | L | U |
|------------------|-------------------|----------------------------|------|----------|------------------------|--------|
| 1 | | Dados de fraturas | | | Cos. dir. | |
| 2 | Tipo de estrutura | Posição na <i>scanline</i> | Rumo | Mergulho | α_{polo} | dn (m) |
| 3 | <i>Scanline</i> | - | 0 | 90 | - | - |
| 4 | Fratura | 19,31 | 189 | 60 | 30,36 | 17,35 |
| 5 | Fratura | 20,00 | 207 | 69 | 21,12 | 17,97 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 178 | Fratura | 58,86 | 89 | 62 | 28,29 | 52,89 |
| 179 | Polo P5 | - | 334 | 62 | 28,9 | - |

Distribuição das fraturas da família do polo P5 (n=49)

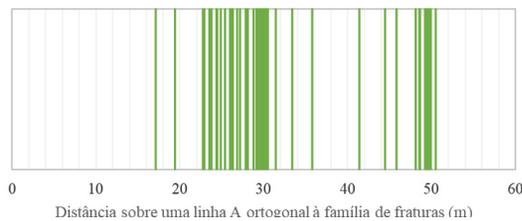


FIGURA 18 – Esquema das estruturas da família do polo P5 (em verde), indicando uma distribuição regularmente variável.

extrapolam para três dimensões ao se realizarem linhas de levantamento em diversas orientações. Recomenda-se a realização de no mínimo três orientações aproximadamente ortogonais entre si.

Por fim, cabe ressaltar que algumas exposições de rocha ou perfurações podem ser demasiadamente curtas para a realização de uma *scanline*, pois devido a seu pequeno comprimento, interceptarão poucas estruturas (viés de comprimento da linha). Em afloramentos curtos ou pequenos, recomenda-se realizar um ponto de observação, em que são feitas anotações sobre as estruturas principais, sem o levantamento sistemático da linha ou, se a superfície permitir, a realização de um levantamento por área (retangular ou circular). Uma questão comumente levantada ao se deparar com este problema é “qual o número mínimo de dados a ser obtido para a correção de orientação”. Na literatura existem estudos que discutem esse valor mínimo (PRIEST 1993, BONNET *et al.* 2001, ZEEB *et al.* 2013); não obstante, os resultados são aplicáveis a casos específicos. Uma resposta elegante, embora ainda pouco definitiva, para o problema é que “é provavelmente impossível obter um número mínimo universalmente aplicável, porque o número necessário de amostras depende da própria rede de fraturas estudada” (tradução livre de ZEEB *et al.* 2013).

9 AGRADECIMENTOS

Este trabalho surgiu da necessidade de oferecer uma derivativa do cálculo de correção do viés de orientação em levantamentos estruturais utilizando planilhas facilmente acessíveis via programas de uso comum. Dessa forma, os autores gostariam de agradecer aos colegas que trouxeram as dúvidas que nos levaram a escrever este trabalho, aos relatores da Revista do IG pelas sugestões apresentadas, e às instituições que financiaram os projetos de pesquisa que possibilitaram seu desenvolvimento e evolução: Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies (FRQNT), Fondation de l’UQAC (FUQAC); Programme d’Acquisition de Connaissances sur les Eaux Souterraines du Québec (PACES); Ministère du Développement Durable, de l’Environnement et des Parcs (MDDEP); FINEP (processo 1824/2010); FAPESP (processos 2013/10311-03 e 2015/02474-5); Ministério Público de São Paulo (TAC 25/09); CAPES (Bolsa de Demanda Social, Programa de Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia IGc/USP); PDSE/CAPES (processo 88881.134986/2016-01).

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLMENDINGER, R.W. 2019. *Stereonet 10. Versão 10.4.2*. Universidade de Cornell, Estados Unidos. <http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/>
- ALT – ADVANCED LOGIC TECHNOLOGY. 2019. WellCAD. Versão 5.3. <https://www.alt.lu/download/>
- BERKOWITZ, B.; ADLER, P.M. 1998. Stereological analysis of fracture network structure in geological formations. *Journal of Geophysical Research*, 103(B7): 15339-

15360. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/98JB01072>
- BONNET, E.; BOUR, O.; ODLING, N. E.; DAVY, P.; MAIN, I.; COWIE, P.; BERKOWITZ, B. 2001. Scaling of fracture systems in geological media. *Reviews of Geophysics*, 39 (3):347-383. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/1999RG000074>
- DUNNE, W. M. & HANCOCK, P. L. 1994. *Paleostress analysis of small-scale brittle structures*. In: P. L. Hancock (ed.) Continental Deformation. UK, Pergamon Press, p.101-120.
- ENGELDER, T. 1994. *Brittle crack propagation*. In: P. L. Hancock (ed.) Continental Deformation. UK, Pergamon Press, p.43-52.
- FANTI, A.; BERTOLO, R.; VOGADO, F.; CAGNON, F.; QUEIROZ, A. P. 2017. Application of geophysical logging and straddle packers for the investigation of a fractured aquifer in a contaminated area by chlorinated solvents in Sao Paulo State, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 9: 1145-1168. https://www.scirp.org/pdf/JWARP_2017091914063808.pdf
- FERNANDES, A.J.; ROULEAU, A. 2008. Simulação de deslocamentos em fraturas em basaltos da Formação Serra Geral (Ribeirão Preto, SP) e implicações para a sua transmissividade. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, Natal, *Anais*, CD-ROM, 20 p. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23832>
- FIUME, B. 2013. *Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 167 p. https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-25092014-150022/publico/Dissertacao_Final_Bruna.pdf
- FOSSON, H. 2018. *Geologia Estrutural*. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2ª ed., 608 p.
- GHOSH, K.; MITRA, S. 2009. Structural controls of fracture orientations, intensity, and connectivity, Teton anticline, Sawtooth Range, Montana. *AAPG Bulletin*, 93(8): 995-1014. <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/93/8/995/133002/Structural-controls-of-fracture-orientations>
- GOODMAN, R.E. 1976. *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*. West Publishing Company, St Paul, 472 p. <https://www.rocsience.com/assets/resources/learning/Methods-of-Geological-Engineering-in-Discontinuous-Rocks.pdf>
- GROHMANN, C.H.; CAMPANHA, G.A.C. 2010. *OpenStereo. Versão 0.1.2f*. Universidade de São Paulo, Brasil. <http://sites.igc.usp.br/openstereo/>
- GROSSENBACHER, K.; KARASAKI, K.; BAHAT, D. 1997. Curved scanline theory. *Mathematical Geology*, 29: 629-651. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02769648>
- HANCOCK, P. L. 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 7(3/4): 437-457. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191814185900483>
- HUDSON, J.A.; PRIEST, S.D. 1983. Discontinuity frequency in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20: 73-89. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0148906283903297>
- KOZANIS, S. 2006. *Stereographic Projection. Versão 2.5.0.4*. Universidade de Atenas, Grécia. <http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/struct/software/stereograph/index.html#Description>
- LACAZETTE, A. 1991. A new stereographic technique for the reduction of scanline survey data of geologic features. *Computers and Geosciences*, 17: 445-463. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/009830049190051E>
- LAPOINTE, P.R.; HUDSON, J.A. 1985. Characterization and interpretation of rock mass joint patterns. *Geological Society of America, Special Publication*, 199: 37 p. <https://pubs.geoscienceworld.org/>

books/book/318/Characterization-and-Interpretation-of-Rock-Mass

LIBRE OFFICE CALC. *Versão 6.3.4. Libre Office*. 2019. <https://pt-br.libreoffice.org/descubra/calc/>

MARTEL, S. J. 1999. Analysis of fracture orientation data from boreholes. *Environmental Engineering Geoscience*, 5: 213-233. <https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/V/2/213/137121>

MAULDON, M. 1998. Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 31: 201-216. <https://link.springer.com/article/10.1007/s006030050021>

MAULDON, M.; MAULDON, J.G. 1997. Fracture sampling on a cylinder: from scanlines to boreholes and tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 30: 129-144. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01047389>

MAULDON, M.; ROHRBAUGH Jr., M. B.; DUNNE, W. M.; LAWDERMILK, W. 1999a. Fracture intensity estimates using circular scanlines. In: US ROCK MECHANICS SYMPOSIUM: ROCK MECHANICS FOR INDUSTRY, 37, *Proceedings*: 777-784. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-99-0777>

MAULDON, M.; ROHRBAUGH Jr., M.B.; DUNNE, W.M.; LAWDERMILK, W. 1999b. Mean fracture length and density estimators using circular windows. In: US ROCK MECHANICS SYMPOSIUM: ROCK MECHANICS FOR INDUSTRY, 37, *Proceedings*: 785-792. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-99-0785>

MAULDON, M.; DUNNE, W.M.; ROHRBAUGH Jr, M.B. 2001. Circular scanlines and windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *Journal of Structural Geology*, 23: 247-258. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814100000948>

MCCLURE, M.W.; BABAZADEH, M.; SHIOZAWA, S.; HUANG, J. 2016. Fully

coupled hydromechanical simulation of hydraulic fracturing in 3D discrete-fracture networks. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21(4): 1302-1320. <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-173354-PA>

MCEWEN, T. J. 1980. *Fracture analysis of crystalline rocks: field measurements and field geometrical techniques*. Environmental Protection Unit 8011, Report of the Institute of Geological Sciences, Harwell Laboratory, Oxfordshire.

MCQUILLAN, H. 1974. Fracture Patterns on Kuh-e Asmari Anticline, Southwest Iran. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 58 (2): 236-246. <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1974-76/data/pg/0058/0002/0200/0236.htm?doi=10.1306%2F83D913C1-16C7-11D7-8645000102C1865D>

MICROSOFT EXCEL 365. *Versão 1911*. Microsoft. (2019). <https://products.office.com/pt-br/home>

MOBASHER, K.; BABAIE, H.A. 2008. Kinematic significance of fold- and fault-related fracture systems in the Zagros mountains, southern Iran. *Tectonophysics*, 451: 156-169. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195107004179?via%3Dihub>

NARR, W. 1991. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello oil field. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75(8): 1300-1323. <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/75/8/1300/38701/Fracture-Density-in-the-Deep-Subsurface-Techniques>

NARR, W. 1996. Estimating average fracture spacing in subsurface rock. *AAPG Bulletin*, 80: 1565-1586. <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article-abstract/80/10/1565/39247/Estimating-Average-Fracture-Spacing-in-Subsurface>

NEVES, B.B.B. 2011. *Glossário de Geotectônica*. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 256p.

PEACOCK, D.C.P.; SANDERSON, D.J. 2018. Structural analyses and fracture network

- characterisation: seven pillars of wisdom. *Earth-Science Reviews*, 184: 13-28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825218302198>
- PEACOCK, D.C.P.; HARRIS, S.D.; MAULDON, M. 2003. Use of curved scanlines and boreholes to predict fracture frequencies. *Journal of Structural Geology*, 25: 109-119. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814102000160?via%3Dihub>
- PEACOCK, D.C.P.; SANDERSON, D.J.; ROTEVATN, A. 2018. Relationships between fractures. *Journal of Structural Geology*, 106: 41-53. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814117302675>
- PINO, D.S. 2012. *Structural Hydrogeology of the Kénogami Uplands*. Sciences Appliquées, Université du Québec à Chicoutimi, Dissertação de Mestrado, 184 p. <https://constellation.uqac.ca/2572/1/030329562.pdf>
- PINO, D.S. 2019. *Aplicação do método Discrete Fracture Network para definição do modelo conceitual hidrogeológico do aquífero fraturado da região de Jurubatuba, São Paulo*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 238 p.
- POLLARD, D.D.; AYDIN, A. 1988. Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100: 1181-1204. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/gsabulletin/article/100/8/1181/182171/Progress-in-understanding-jointing-over-the-past>
- PRIEST, S. D. 1993. *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, London, 473 p.
- PRIEST, S.D.; HUDSON, J.A. 1981. Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 18: 183-197. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906281909736>
- ROCSCIENCE. 2019. *DIPS. Versão 7.016*. <https://www.rocscience.com/software/dips>
- ROD HOLOCOMBE. 2015. *GEorient. Versão 9.5*. <https://holcombe.net.au/software/georient.html>
- ROHRBAUGH, M.B.; DUNNE, W.M.; MAULDON, M. 2002. Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 86(12): 2089-2104. <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article/86/12/2089/39961/Estimating-Fracture-Trace-Intensity-Density-and>
- RÖLLER, K.; TREPMANN, C.A. 2010. *Stereo 32. Versão 1.0.2*. Universidade de Bochum, Alemanha. <https://www.ruhr-uni-bochum.de/hardrock/Stereo32/default.htm>
- ROULEAU, A.; GALE, J.E. 1985. Statistical characterization of the fracture system in the Stripa Granite, Sweden. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 22(6): 353-367. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906285900014>
- ROWLAND, S.M.; DUEBENDORFER, E.M.; SCHIEFELBEIN, I.S. 2007. *Structural Analysis and Synthesis: a laboratory course in Structural Geology*. 3rd edition. Blackwell Publishing, Malden, 322 p.
- ROY, D.W. 2011. *Annexe 3B – Cosinus Directeurs*. Université du Québec à Chicoutimi, Notas de aula.
- SARTORIO, F. 2019. *Modelo conceitual do aquífero fraturado de uma área industrial em Barra Mansa, RJ*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 93 p.
- SCHOENBERG, T. 2015. *InnStereo. Versão Beta 6*. <https://innstereo.readthedocs.io/en/latest/>
- SLOB, S.; HACK, H.R.G.K.; FENG, Q.; RÖSHOFF, K.; TURNER, A.K. 2007. Fracture mapping using 3D laser scanning techniques. In: CONGRESS OF THE

- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 11, *Abstracts*, 3: 299-302. https://www.researchgate.net/publication/253954098_Fracture_mapping_using_3D_laser_scanning_techniques
- TERZAGHI, R. D. 1965. Sources of error in joint surveys. *Geotechnique*, 15(3): 287-304.
- WANG, X., MAULDON, M. 2006. Proportional errors of the Terzaghi correction factor. In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 41, ARMA/USRMS 06-1055, 6 p. <https://www.onepetro.org/conference-paper/ARMA-06-1055>
- WARBURTON, P.M. 1980a. A stereological interpretation of joint trace data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 17: 181-190. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906280910840>
- WARBURTON, P.M. 1980b. Stereological interpretation of joint trace data: influences of joint shape and implications for geological surveys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 17: 305-316. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906280905136>
- WATKINS, H.; BOND, C.E.; HEALY, D.; BUTLER, R.W.H. 2015. Appraisal of fracture sampling methods and a new workflow to characterise heterogeneous fracture networks at outcrop. *Journal of Structural Geology*, 72: 67-82. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191814115000309>
- WOJTAL, S. 1989. Measuring displacement gradients and strains in faulted rocks. *Journal of Structural Geology*, 11: 669-678. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191814189900035>
- WPS OFFICE SPREADSHEETS. *WPS Office*. 2019. <https://www.wps.com/spreadsheets>
- WU, H.; POLLARD, D.D. 1995. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness. *Journal of Structural Geology*, 17: 887-905. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019181419400099L>
- YOW Jr., J.L. 1987. Blind zones in the acquisition of discontinuity orientation data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, Technical Note 24(5): 317-318.
- ZEEB, C.; GOMEZ-RIVAS, E.; BONIS, P.D.; BLUM, P. 2013. Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*, 97(9): 1545-1566. <https://pubs.geoscienceworld.org/aapgbull/article/97/9/1545/133361/Evaluation-of-sampling-methods-for-fracture>
- ZOHO SHEET. *Zoho Corporation*. 2019. <https://www.zoho.com/pt-br/sheet/?src=zoho-home&ireft=ohome>

Endereço dos autores:

Daphne Silva Pino e Reginaldo Antônio Bertolo – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. *E-mails:* daphne.pino@usp.br, bertolo@usp.br

Denis W. Roy e Alain Rouleau – University of Québec, 555, boulevard de l'Université, G7H 2B1, Chicoutimi, QC, Canadá. *E-mails:* denis_roy@uqac.ca, Alain_Rouleau@uqac.ca

Amélia João Fernandes – Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, Rua Joaquim Távora, 822, CEP 04015-011, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* amelia.jfernandes@gmail.com

Artigo submetido em 21 de novembro de 2019, aceito em 23 de dezembro de 2019.