

O MÉTODO DO MAPA DE LINHAS DE FORMA ESTRUTURAL E SUAS APLICAÇÕES NA GEOLOGIA DE ENGENHARIA

Daniel Prates Pederneiras Barbosa ¹; Wellison Martins Fonseca ²; Bruno Henrique Longuinho Gouveia ³; Ellen Delgado Fernandes ⁴

Resumo – A Geologia de Engenharia e a Geotecnia são fortemente atuantes no setor minerário, principalmente na importante província mineral do sudeste brasileiro conhecida como Quadrilátero Ferrífero. Os litotipos que, geralmente, compõem os taludes das minas nessa região, referem-se a rochas foliadas com resistências mecânicas variáveis, na maioria das vezes brandas a muito brandas. Visando analisar a variabilidade geométrica das foliações, Hasui (1992), exemplifica como o Método das Linhas de Forma pode ser aplicado para o reconhecimento de estruturas associadas a zonas de cisalhamento. Nesse sentido, com o objetivo de divulgar o Método das Linhas de Forma como artifício cartográfico na determinação de domínios estruturais e feições geológicas e sua interpretação, este trabalho apresenta os critérios para a definição e aplicação do método, correlações estruturais, aplicações das Linhas de Forma na Geologia de Engenharia e, por fim, estudos de caso de duas minas localizadas no Quadrilátero Ferrífero.

Abstract – Both Engineering Geology and Geotechnics have a significant role in the mining sector, mainly in the Iron Quadrangle, an important mineral province in Minas Gerais state. Usually, the lithotypes that compose the slopes in this area's mines are foliated rocks with a variable range of resistance degrees, but mainly weak rocks. Hasui (1992) analyses the geometric variability of foliation by exemplifying how the method of trace form lines can be applied for recognizing shear zone related geological structures. With the objective of publicizing the use of the trace form lines method as a cartographic device in the interpretation and determination of structural domains and geological patterns, this research presents the criteria for the definition and application of this method, structural correlations, application in the Engineering Geology, and finally, case studies in two mines in the Iron Quadrangle.

Palavras-Chave – Linhas de forma estrutural, Foliação, Geologia de Engenharia, Geologia Estrutural, Domínios estruturais.

¹ Geól., WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) (31) 3234-4003, daniel.prates@walmengenharia.com.br
² Geól., WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) (31) 3234-4003, wellison.fonseca@walmengenharia.com.br
³ Geól., WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) (31) 3234-4003, bruno.gouveia@walmengenharia.com.br
⁴ Geól., WALM BH Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) (31) 3234-4003, ellen.fernandes@walmengenharia.com.br

1. INTRODUÇÃO

A Geologia de Engenharia e a Geotecnia atuam de modo muito significativo no setor mineral, principalmente, na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, importante província mineral do sudeste brasileiro (Minas Gerais). De acordo com Martin & Stacey (2017), os litotipos que geralmente compõem os taludes das minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero (QF) referem-se, invariavelmente, a rochas extremamente anisotrópicas (foliadas), com resistências variáveis, mas, na maioria das vezes, brandas a muito brandas.

Segundo Fossen (2012), as foliações tectônicas (*lato sensu*) são estruturas geológicas planares, caracterizadas pela orientação planar dos minerais nas rochas afetadas tectonicamente. Estão presentes em rochas regionalmente metamorizadas, inseridas em regiões afetadas por regimes tectônicos compressivos e/ou transpressivos. Essas feições, podem ser persistentes e penetrativas e condicionam anisotropias nos maciços rochosos, podendo constituírem-se em importantes descontinuidades, as quais podem apresentar variações de suas resistências segundo direções diferentes no maciço rochoso (ABGE, 2018).

As foliações dos litotipos metavulcanossedimentares do QF são de gêneses diversas, sendo as mais frequentes: o bandamento composicional, o acamadamento, a xistosidade e a foliação milonítica, geradas, principalmente, por mecanismos de dobramento e cisalhamento diversos, dúcteis e dúcteis-rúpteis, em condições metamórficas de fácies xisto verde e anfíbolito (Chemale *et al.*, 1994). Embora associadas a origens diversas, as foliações apresentam-se, em geral, paralelizadas entre si e associadas à lineação de estiramento mineral, as quais definem a geometria dos corpos rochosos, ou seja, definem os contatos entre os diversos litotipos (Hasui *et al.*, 1994).

Na Geologia de Engenharia e Geotecnia, o entendimento das estruturas geológicas e suas relações geométricas condiciona o desenvolvimento de cavas, pilhas de rejeito e de estéril, além de fundações diversas. O conhecimento do comportamento espacial da foliação é de suma importância para o entendimento da cinemática dos mecanismos de rupturas passíveis de acontecer, em decorrência das solicitações impostas pela obra, uma vez que, essa estrutura geológica, na maioria das vezes, condiciona a estabilidade nos taludes e dos maciços rochosos (ABGE, 2018).

Para analisar a variabilidade geométrica espacial das foliações, quando já se dispõe de vários afloramentos ou de uma cava aberta, pode-se utilizar um método simples, prático e eficiente: o Mapa de Linhas de Forma Estrutural.

Apesar de ser uma boa prática, reconhecida nos projetos de mapeamento geológico-geomecânico, seu conceito e execução ainda são pouco difundidos na comunidade técnico-científica e quase não são encontradas referências sobre a utilização desse método. Hasui & Mito (1992), no livro didático intitulado “Geologia Estrutural Aplicada”, exemplificam como as linhas de forma podem ser aplicadas para o reconhecimento de estruturas ligadas a zonas de cisalhamento.

Diante dessa constatação, este trabalho apresenta os critérios para a definição e aplicação do Método das Linhas de Forma Estrutural em Geologia de Engenharia e a sua utilidade para a efetivação de correlações estruturais, exemplificando com estudos de caso no Quadrilátero Ferrífero, tendo por objetivo a divulgação do método como artifício cartográfico na interpretação e determinação de domínios estruturais e feições geológico-estruturais.

2. CONCEITOS E CRITÉRIOS PARA CONSTRUÇÃO DO MAPA DE LINHAS DE FORMA

As linhas de forma, conforme Hasui *et al.* (1988, 1992, 1994) são, em essência, traços que representam a tendência, em planta, da orientação estrutural da foliação, inferida mediante extrapolação para áreas circunvizinhas aos pontos de medição de atitudes medidas *in situ* (Figura 1).

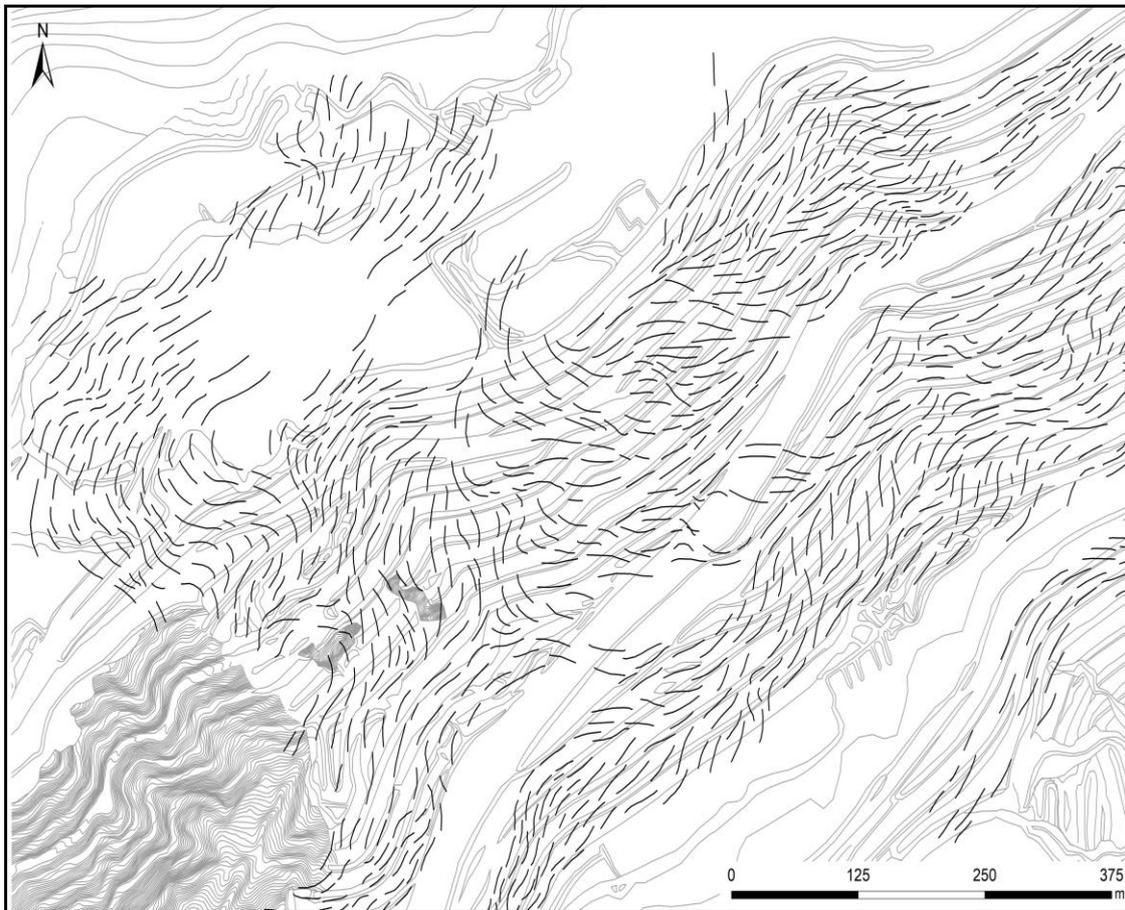


Figura 1: Mapa de linhas de forma estrutural. Modelo esquemático. Em preto, linhas de forma. Em cinza curvas de nível.

O conceito presente no mapa de linhas de forma estrutural é de extrema importância em geologia estrutural, uma vez que é utilizado para a identificação de tipologias e padrões geométricos estruturais da foliação, os quais foram gerados por deformação progressiva de caráter dúctil/dúctil-rútil, em sistemas tectônicos compressivos e transpressivos, assim como no auxílio para a interpretação da cinemática estrutural (Hasui & Mioto, 1992).

Para obtenção de um mapa de linhas de forma com representatividade adequada da variabilidade geométrica das foliações, é necessário distribuir o máximo possível de pontos de medição no levantamento de campo, de modo igualitário e equidistantes, onde a distância entre pontos de medida deve ser compatível com a escala do mapa que está sendo elaborado.

A representação geral do comportamento da foliação pelas linhas de forma, em planta, envolve, além da correta plotagem da direção (*strike*) dos planos estruturais medidos, a representação apropriada do mergulho do conjunto geral dessas estruturas, dado pelo espaçamento lateral, em planta, entre as linhas de forma desenhadas. Dessa forma, mergulhos de alto ângulo da foliação resultarão em linhas com curto espaçamento em seu entorno e, à medida em que se diminui o ângulo de mergulho das foliações medidas, aumenta-se o espaçamento dentre seus traços (Figura 2).

Para isso, pode-se separar intervalos de mergulhos da foliação, utilizando-se cores para diferenciar faixas de valores de ângulos de mergulho (por exemplo, 0° a 30° - verde, 31° a 60° - amarelo, 61° a 90° - vermelho) e, deste modo, além da orientação, pode-se ter uma avaliação da variabilidade espacial dos mergulhos das foliações.



Figura 2: Construção das linhas de forma, a partir das atitudes estruturais extrapoladas obtidas com espaçamento regular e separação de intervalos de mergulho. Em preto, linhas de forma. Em cinza curvas de nível.

Além das medidas de foliação, pode-se utilizar como complemento à base de dados do mapa de linhas de forma, medidas de lineação mineral e de estiramento mineral. As lineações de estiramento, por exemplo, situam-se no plano da foliação milonítica de zonas de cisalhamento dúctil e indicam a direção X (σ_3) da deformação finita (Fossen, 2012). Essa relação geométrica deve ser levada em consideração durante o traçado das linhas de forma, de modo a representar com maior fluidez e movimento o padrão estrutural.

3. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DO MAPA DE LINHAS DE FORMAS ESTRUTURAIS E SUA APLICAÇÃO NA GEOLOGIA DE ENGENHARIA

A partir da construção e interpretação do mapa de linhas de forma, é possível verificar geometrias de fluxos dúcteis e estruturas perceptíveis somente a partir de escala megascópica. Estruturas geológicas comumente reveladas pelas linhas de forma são dobras de arrasto, estruturas do tipo S/C, zonas de cisalhamento, padrões “amendoados” ou anastomosados (Hasui, 1992), onde a foliação milonítica, em fluxo plástico, contorna corpos mais rígidos (menos deformados), apresentando ondulações com variações de direção e mergulho (Figura 3).

Por intermédio do mapa de formas e dos contatos litológicos, definem-se os domínios estruturais. O estabelecimento dos domínios estruturais tem o objetivo de individualizar regiões onde a foliação apresenta um padrão estrutural similar quanto à direção dos planos entre as medidas que o compõem.

Deste modo, para determinação inicial dos domínios litoestruturais, leva-se em conta principalmente a variação geométrica das foliações, (estruturas que, na maioria das vezes, condicionam as instabilidades observadas nos taludes), e dos diversos grupos de litotipos presentes. Nos estudos de casos, são apresentados exemplos de como foram definidos os domínios estruturais para algumas cavas do Quadrilátero Ferrífero.

O estabelecimento dos domínios estruturais dá suporte à avaliação cinemática, que tem o intuito de identificar os modos geométricos prováveis de ruptura dos litotipos estudados nos diversos compartimentos geométricos da cava.

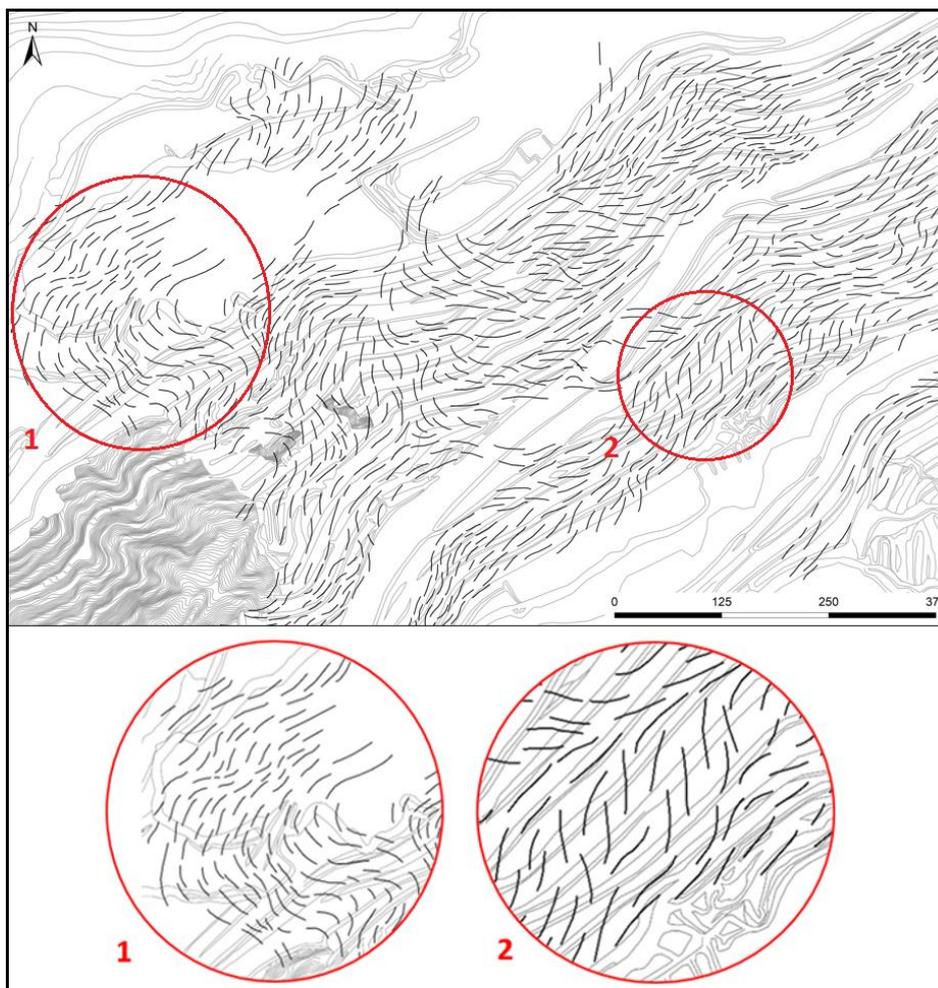


Figura 3 - Identificação de estruturas geológicas em escala de mapa pelo Método das Linhas de forma. Em (1) dobra de arrasto apertada. Em (2), padrão anastomosado da foliação.

O procedimento final de análise refere-se à compatibilização dos domínios geomecânicos às geometrias dos taludes. Nesta fase definem-se os mecanismos de ruptura e realizam-se as análises de estabilidade utilizando-se a geometria das estruturas condicionantes e os parâmetros geomecânicos de cada domínio.

Paralelamente ao procedimento supracitado, constrói-se o modelo geoestrutural como subsídio ao modelo geomecânico, cujo objetivo é o entendimento bem fundamentado dos processos e tipos deformacionais que ocorrem na área foco do estudo e estabelecer a estruturação geológica em superfície e subsuperfície.

Na elaboração do desse modelo, três conjuntos de informações são essenciais, segundo Hasui *et al.* (1993):

- Tipologia estrutural – Identificação dos tipos de estruturas geológicas que condicionariam a estabilidade dos taludes;
- Padrão geométrico e arranjo espacial das estruturas que definem os diferentes domínios estruturais do maciço rochoso.
- Padrão cinemático – Entendimento da movimentação de massa geral, comportamento reológico dos maciços rochosos, processos e regimes tectônicos que originaram a estruturação estudada.

Enumerados os processos de consolidação do modelo geoestrutural, entende-se que o Método do Mapa de Linhas de Forma Estrutural será a base para determinação do padrão geométrico e cinemático (quando combinados linhas de forma e lineações de estiramento) da geologia estrutural investigada.

4. ESTUDOS DE CASOS NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A seguir, são apresentados dois estudos de casos no Quadrilátero Ferrífero, realizados na década de 1990, em que o mapa de linhas de forma foi utilizado como ferramenta auxiliar na análise e interpretação de feições e domínios estruturais. Essas análises culminaram no entendimento da geometria e cinemática deformacional das áreas analisadas, servindo de base para a tomada de decisões em projetos de Geologia de Engenharia. As informações dos estudos encontram-se condensadas e tangem com maior propriedade as informações pertinentes a análise dos mapas de linhas de forma e definição dos domínios estruturais.

4.1. Modelo Estrutural da Mina de Ferro do Cauê – Itabira/MG

A Mina do Cauê localiza-se no município de Itabira, região nordeste do Quadrilátero Ferrífero, no flanco oeste do chamado “Sinclinal de Itabira” (Dorr *et al.*, 1969). Com o objetivo de fornecer subsídios à análise de estabilidade dos taludes da porção oeste da cava, Hasui *et al.* (1994), realizaram a caracterização e definição da geometria estrutural da mina, bem como a análise e interpretação da cinemática que a gerou.

O trabalho se desenvolveu com metodologia convencional em mapeamento geológico-estrutural, com coleta de dados estruturais em 773 pontos, distribuídos ao longo das bancadas e distanciados 30m entre si. A caracterização litológica não foi objetivo das investigações, sendo adotada as definições de uso corrente na mina. As análises estereográficas foram processadas com base no diagrama de igual área, rede de Schmidt-Lambert, pelo programa TRADE, desenvolvido pelo IPT.

Na área de estudo foram reconhecidas feições estruturais de tipos variados, sendo as mais importantes a foliação principal (S1) e a lineação de estiramento mineral (L1), que caracterizam a anisotropia principal do maciço. Além destas estruturas, foram reconhecidas zonas de transcorrência, estruturas S/C, corpos sigmoidais, dobras de diferentes tipos e gêneses, crenulações, veios de quartzo e juntas, que foram interpretadas e agrupadas em 5 cinco grupos, com base no sequenciamento estrutural que se desenvolveu de 1 para 5. Neste trabalho será apenas exibida a análise e interpretação das principais estruturas para a definição dos domínios estruturais.

A partir do tratamento dos dados, foi elaborado o mapa litoestrutural (Figura 4) com o traçado das linhas de forma, delineadas a partir das medidas de foliação e lineação, em escala de 1:1000. O mapa de linhas de forma foi de grande importância para a visualização das direções da foliação e do padrão geométrico dos corpos em planta, o que possibilitou a definição dos domínios estruturais A e B, situados nas porções sul e norte da cava, respectivamente.

Como se pode observar na Figura 4, o domínio estrutural A, localizado na região sul da cava, possui duas direções de foliação (S1): em torno de N-S na porção central do domínio e direção NW-SE em sua região oeste. Em geral, os mergulhos variam de baixos a médios voltados para leste. Os estereogramas das medidas estruturais apresentam pouca variação e delineiam uma guirlanda, cujo eixo é subparalelo a direção da lineação de estiramento L1. O estereograma de igual área com as medidas de foliação do domínio A é apresentado na Figura 5a.

O domínio B, localizado na porção norte da área apresenta direção da foliação variando de ENE-WSW a oeste (trecho do flanco norte da sinforma do Cauê) para E-W a leste. Os mergulhos são baixos/médios a oeste e altos/baixos a leste, cujo caimento, em geral, é voltado para sul, exceto na região leste onde ocorre trechos de S1 com caimento para norte. O estereograma do domínio B (Figura 5b) apresentou alguma dispersão, delineando a mesma guirlanda em que o eixo também é coincidente/subparalelo à lineação de estiramento mineral L1.

A Figura 5c apresenta o estereograma de todas as medidas de lineação de estiramento mineral aferidas na área de estudo. Observa-se que as medidas não apresentam grande dispersão, o que indica que a direção de movimento de massa se manteve constante ao longo da

deformação em ambos os domínios, coincidentes com o eixo $X//\sigma_3$ do elipsoide de deformação, indicando caráter de cavalgamento no domínio A e de transcorrência no domínio B.

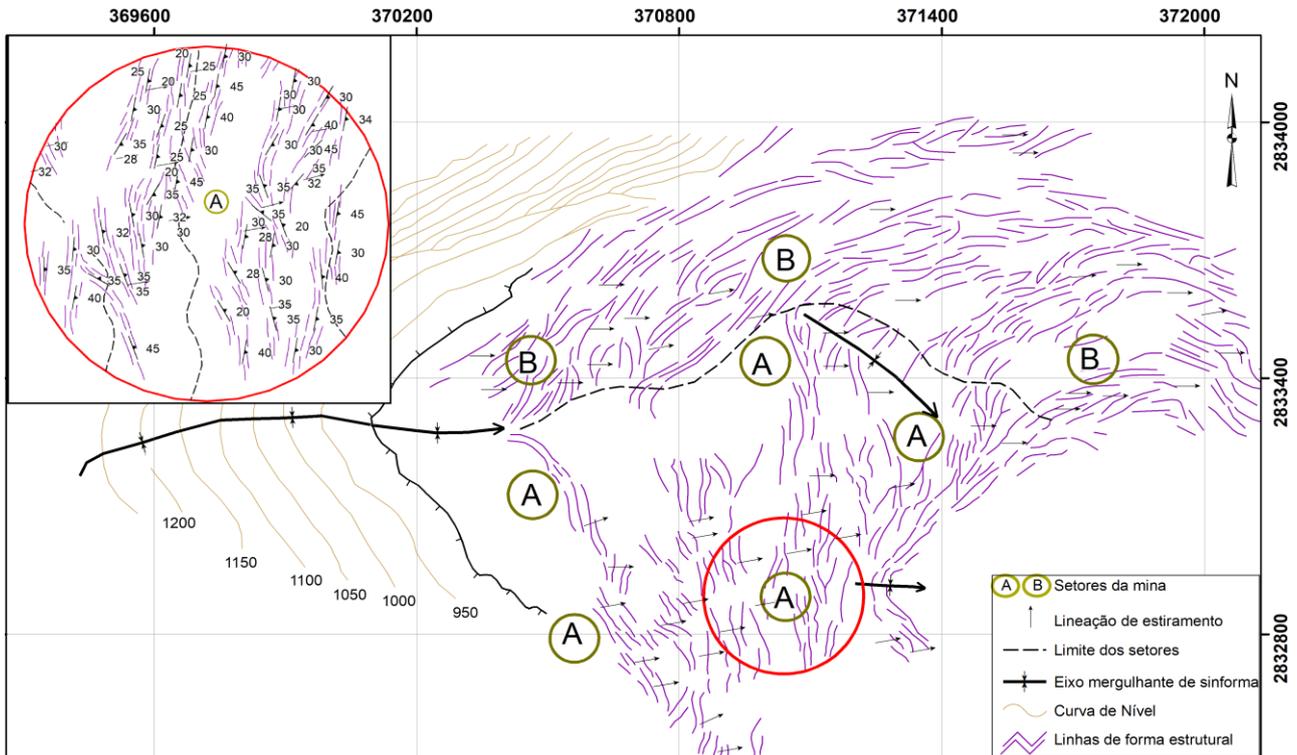


Figura 4: Mapa litoestrutural simplificado da Mina do Cauê, Itabira - MG. Modificado de Hasui *et al.* (1994).

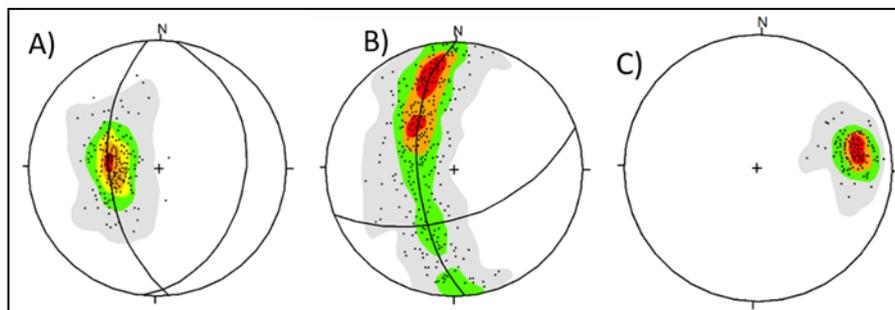


Figura 5: A) Estereograma de igual área das medidas de foliação, domínio A. B) Estereograma de igual área das medidas de foliação, domínio B. C) Estereograma de igual área das medidas de lineação em toda a área de estudo.

De acordo com Hasui *et al.* (1994) as guirlandas representam ondulações de S_1 , correspondentes a: (1) ondulações em torno de *boudins* e amêndoas (sigmóides da foliação); (2) dobras superimpostas a S_1 e (3) arrastos ligados a zonas transcorrentes. As variações de atitude são bem realçadas pelas linhas de forma estrutural. Elas evidenciam as mudanças de direções da foliação e delineiam o padrão deformacional, que são utilizados como base para a definição dos domínios estruturais.

4.2. Estruturação e formação dos minérios de ferro: Jazida da Mina de Alegria, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais (1995)

A jazida de ferro da Mina de Alegria situa-se na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, a sul da Serra do Caraça. Está alojada na Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas, ao longo de uma estrutura sinformal, o denominado "Sinclinal" de Alegria, em sua aba norte. A estrutura tem eixo NW-SE encurvado, mergulhando para SE, e, em sua aba norte, possui direção E-W. A sinforma de Alegria é constituída por litotipos variados, atribuídos ao Supergrupo Rio das Velhas e ao Supergrupo Minas (grupos Caraça, Itabira e Piracicaba) (Dorr II, 1969).

Na área da Mina de Alegria o minério de ferro é constituído por massas heterogêneas, cujas partes se arranjam de maneiras variadas. Com o objetivo de otimizar as operações da Mina de Alegria, Hasui *et al.* (1994) realizaram a caracterização das associações texturais, mineralógicas e estruturais da área, o que serviu como base para fundamentar previsões e extrapolações de resultados na superfície e em profundidade. Para tanto, foram realizados os seguintes estudos: (1) definição da constituição dos materiais presentes (tipologia dos minérios e materiais associados); (2) estabelecimento dos limites dos corpos e sua distribuição espacial (os padrões litoestruturais da jazida); e (3) elaboração do modelo de gênese da jazida.

Para realização desses objetivos, foram executadas: (1) investigações de campo, envolvendo levantamento lito-estrutural sistemático em escala 1:1.000, mediante observações contínuas ao longo das bancadas e galerias, com 1.200 estações de medição espaçadas e aferição de 4.000 atitudes estruturais; (2) reavaliação de todos os testemunhos de sondagem disponíveis, com revisão de 26 seções geológicas da mina e traçado de quatro mapas de níveis horizontais; e (3) investigações laboratoriais de 300 amostras de rocha retiradas da cava e dos testemunhos de sondagem, analisadas em seções polidas e seções delgadas, ao microscópio petrográfico e lupa binocular.

A anisotropia principal observada pelos autores para a área estudada foi a foliação (*lato sensu*), constituída por diversas estruturas planares, paralelizadas entre si. Foram determinadas duas gerações de foliação, nomeadas de S1', mais antiga, pouco pervasiva, limitada a porções circundadas pela foliação mais jovem e pervasiva, S1'', reconhecida como a principal anisotropia dos litotipos mapeados, denominada simplesmente de S1. Os padrões geométricos observados foram a transposição e paralelismo de S1' por S1'', em alguns casos, a discordância dessas duas foliações formam padrões anastomosados do tipo S/C. Outras feições estruturais importantes relatadas foram dobras intrafoliais, com flancos rompidos e assimétricas, dobras superimpostas, com planos axiais paralelos e/ou oblíquos a S1 e quatro famílias de juntas. Diretamente associada à foliação principal, ocorre uma lineação de estiramento mineral (L1), também pervasiva em todos os litotipos, que delimita o eixo de maior alongação de minerais e dos corpos rochosos em geral.

A partir das atitudes de S1, foi possível traçar as linhas de tendências direcional, que resultaram no mapa de linhas de forma estrutural apresentado na Figura 6. Como se pode observar no mapa, os contatos litológicos acompanham a tendência geral das linhas de forma e definem claramente o padrão amendoado da jazida, não só marcando a geometria dos corpos menores, como também a estruturação interna de todos eles.

Para a definição mais precisa da geometria estrutural, os autores dividiram a cava em seis setores estruturais, de acordo com a homogeneidade da orientação da foliação e quantidade de dados. A análise por setores mostrou que as direções preferenciais de S1 variavam de N38°E a N83°E e os mergulhos, de 40° a 70°. Considerando o padrão mais ou menos uniforme dos vários setores, os dados foram tratados em conjunto e apresentados em estereogramas de igual área.

Os estereogramas de foliação (Figura 6A e B) evidenciam, na projeção de polos, a dispersão segundo uma guirlanda com atitude N14°E/46°NW e eixo S76°E/44°. As curvas de isofrequência delineiam a orientação preferencial de S1 segundo N48°E/50°SE. A lineação de estiramento mineral (L1) não apresenta variação expressiva de direção e mergulho nos diversos setores, cuja

orientação média é $S70^{\circ}E/50^{\circ}$, ou seja, praticamente coincide com o eixo médio das guirlandas de S1.

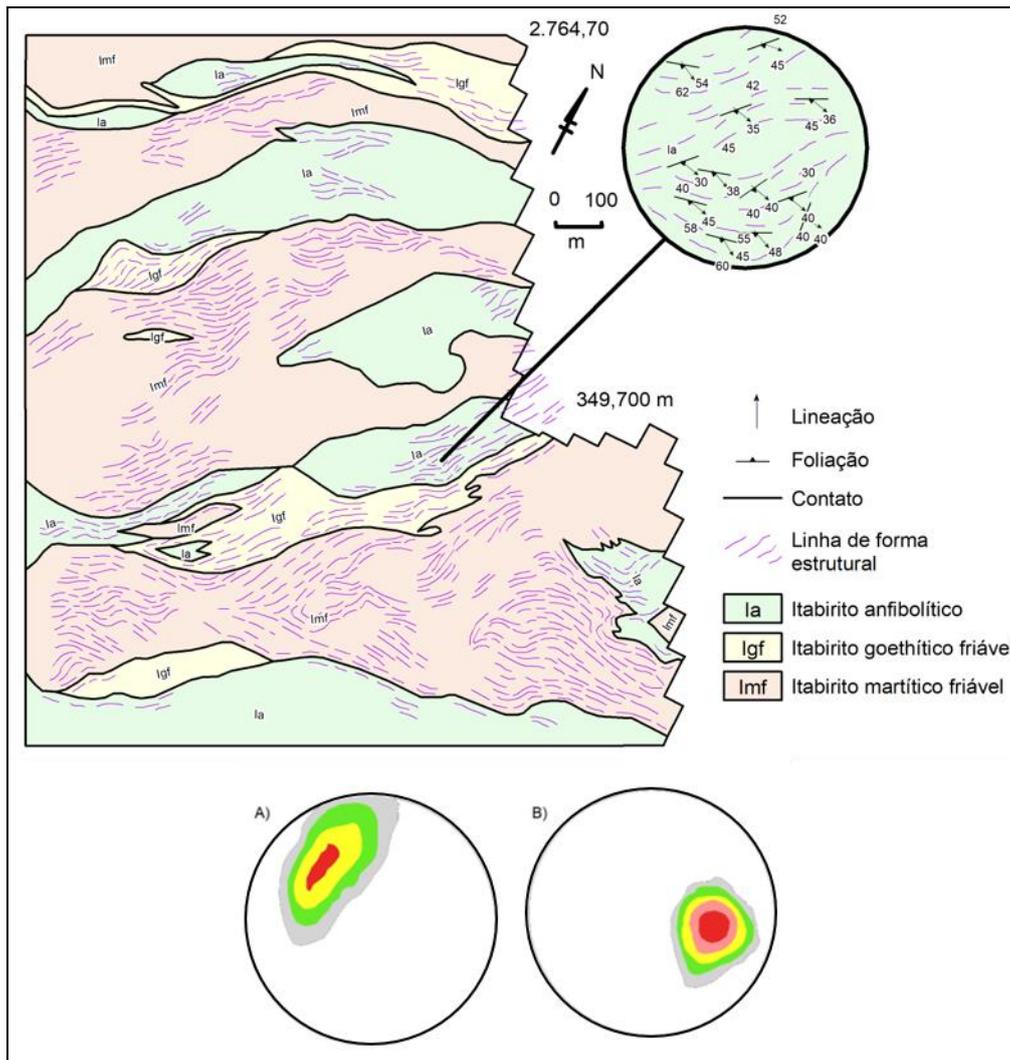


Figura 6: Mapa de linhas de forma da porção ocidental da Mina de Alegria. O detalhe em círculo à direita superior demonstra o padrão anastomosado da foliação e a tendência uniforme da lineação de estiramento mineral. Parte inferior da figura: Estereogramas Schmidt-Lambert. A) curvas de isofrequência de S1. B) curvas de isofrequência de L1.

A partir da análise e interpretação do arcabouço estrutural da Mina de Alegria, Hasui *et al.* (1994) interpretaram a deformação indicada pelas feições estruturais, tendo sido desenvolvidas, inicialmente, em regime de deformação dúctil, progressiva e não-homogênea, com características de não-coaxialidade, onde S1 e L1 são as estruturas mais importantes, ambas respondendo pela geometria geral da jazida.

5. CONCLUSÕES

O Mapa de Linhas de Forma Estrutural é um artifício cartográfico, simples, prático e eficiente, que possibilita analisar, em planta, a variabilidade geométrica das foliações, o que possibilita interpretar e definir, com maior assertividade, os contatos litológicos, a presença de estruturas do tipo S/C, dobras diversas e zonas de cisalhamento, geradas, principalmente, por mecanismos de dobramento e cisalhamento diversos, em condições dúcteis e dúcteis-rúpteis, estruturas que são, muitas vezes, perceptíveis somente a partir de escala megascópica.

O uso do mapa de linhas de forma é de suma importância na geologia de engenharia, devido à sua aplicação para a identificação de domínios estruturais, tipologias e padrões geométricos da foliação, que são bases para se entender os possíveis mecanismos cinemáticos de rupturas passíveis de ocorrer em taludes rochosos, principalmente quando se tratam de rochas extremamente anisotrópicas (foliadas) com resistências variáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Geólogo Dr. Fábio Soares Magalhães pela orientação e ensino do método das linhas de forma, pelo encorajamento e incentivo à superação dos desafios encontrados nos diversos caminhos da Geologia de Engenharia.

Ao Geólogo Dr. Adalberto Aurélio Azevedo por fomentar discussões e contribuir com observações pertinentes ao desenvolvimento do trabalho.

O presente trabalho é dedicado à memória do Professor Dr. Yociteru Hasui, referência na geotectônica, geologia estrutural e de engenharia, pioneiro na construção e aplicação do método do mapa de linhas de forma, inspiração para a consolidação desse trabalho.

REFERÊNCIAS

CHEMALE, F., Jr., ROSIÉRE, C.A., ENDO, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res.* 65 (1994), 25–54.

DORR J. V. N. II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM. Professional Paper 641-A. 110p.

FOSSEN, HAAKON. *Geologia Estrutural*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 584 p.

FOSSEN, H., CAVALCANTE, G., C., PINHEIRO, R. V. L.; ARCHANJO, C., J. 2019. Deformation: Progressive or multiphase? *Journal of Structural Geology*[S.I.], v. 125. p. 82-99.

HASUI, Y., COSTA J. B. S., (1988). Curso de zonas e cinturões de cisalhamento. Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, nov. 1988. Belém, SBG/UFPA, 86 p.

HASUI, Y., MIOTO, J.A. 1992. *Geologia Estrutural Aplicada*. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, Votorantim. 459 p.

HASUI, Y., ZANARDO, A.; HACKSPACHER, P. C.; VERISSIMO, C. U. V. ; FEITOSA, Vitor Marcio Nunes ; COELHO, L. H. 1994. Mina de Alegria (Porção Ocidental). Parte II - Modelo Estrutural e Evolutivo da Jazida de Ferro. *Geociências* (São Paulo. Impresso), Rio Claro, SP, v. 13, n.1, p. 121-148.

HASUI, Y., MAGALHÃES, F. S., RAMOS, J. M. S., CARBONARI, F. S., SANDRONI, S. S. Modelo estrutural da Mina do Cauê. 1994. *Geociências* (UNESP. Impresso), São Paulo, v. 13, n.1, p. 149-166.

HASUI, Y., SALAMUNI, E., MORALES, N., 2019. *Geologia estrutural aplicada - 2. ed. rev.* - São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 478 p.

HERZ, N. *Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Washington, USGS Professional Paper, n. 641-C, 1978.

MARTIN, D. STACEY, P. 2018. *Cemented Sediments. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*, D. Martin and P. Stacey (eds.), CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, p. 127-167.

OLIVEIRA, A., M., S.; MONTICELI, J., J., (Eds.) 2018. *Geologia de engenharia ambiental*. São Paulo: ABGE. 912 p.