

6 – A ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO COMO FERRAMENTA AUXILIAR NA DEFINIÇÃO ESTRATIGRÁFICA

6.1 – MÉTODOS DE ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO: DESCRIÇÃO E LIMITAÇÕES

Diferentes métodos de quantificação da deformação têm sido utilizados principalmente após os trabalhos de Ramsay (1967). Estes métodos surgiram pela necessidade de se quantificar, e não apenas qualificar a deformação nos estudos relacionados à análise estrutural, uma vez que deformação pode ser entendida como o conjunto de modificações na posição, forma e/ou volume de uma rocha frente a esforços diversos. Dentre as técnicas de análise quantitativa da deformação têm destaque o método Fry (1979) e o método Rf/φ (Ramsay, 1967; Ramsay & Huber, 1983; Lisle, 1985).

O método idealizado por Fry (1979) assume como pressuposto fundamental que a distância entre os centros das partículas analisadas (*e.g.* minerais de uma rocha ígnea equigranular) apresentavam valores aproximadamente iguais em seu estado indeformado. Já no estado deformado tais distâncias mostram um aumento no campo extensional e redução no campo contracional. A aplicação do método é simples, iniciando-se pela definição dos centros das partículas (por exemplo, a partir de fotomicrografia). A fotomicrografia é coberta por *overlay* com uma marca central que é deslocada ao centro de cada objeto, marcando-se então o centro de todas as outras partículas. Tem-se, ao final, uma zona de baixa densidade de pontos ao redor da marca central, e uma nuvem de pontos externos a esta zona. No caso de amostras deformadas, a zona de sombra terá geometria elíptica, sendo circular para amostras não deformadas.

O método Rf/φ , extensamente discutido por Ramsay & Huber (1983) e Lisle (1985), assume que a matriz e os objetos elipsoidais são deformados de maneira conjunta. Para cada objeto elíptico mede-se a razão entre os eixos (Rf) e o ângulo φ entre o eixo maior e uma superfície de referência (Fiori, 1997). Estes parâmetros dependem tanto da orientação inicial das partículas (θ) quanto das razões axiais originais (Ri).

Os métodos de quantificação da deformação apresentam uma série de restrições e dificuldades intrínsecas, conforme discutido pelos autores supracitados e por Knauer

(1999) e Cordeiro (2008). As limitações são ainda maiores quando da análise de rochas metassedimentares, dado que geralmente pouco se conhece a respeito da geometria das partículas após o processo diagenético e anteriormente à deformação imposta por tectonismo. Knauer (*op. cit.*) reforça que o número de trabalhos publicados com determinações do elipsóide de *fabric* de rochas sedimentares não deformadas tectonicamente é pequeno. Variáveis independentes influenciam a orientação e a forma dos grãos deformados (Dunnet, 1969), dentre as quais destacam-se a forma inicial das partículas, sua orientação axial original, a intensidade e orientação da deformação e o contraste de ductilidade entre a partícula e o sistema matriz + partícula.

A maior parte das análises da deformação parte de um conjunto de considerações básicas usualmente não confirmadas em estudos sedimentológicos. Os métodos tradicionalmente utilizados na determinação quantitativa do *strain* exigem que pelo menos uma das seguintes condições iniciais seja obedecida:

- a. Os objetos analisados têm formas circulares em seção;
- b. Os objetos não-circulares apresentam distribuição randômica;
- c. O *fabric* inicial é simétrico com relação ao acamamento;
- d. A influência do *fabric* inicial é reconhecível após o tectonismo.

Paterson & Yu (1994) trabalharam amostras de arenitos não deformados de diferentes proveniências com o intuito de determinar a influência dos parâmetros primários sobre o estado final deformado. Foram produzidos elipsóides via medição de mais de 50 grãos em pelo menos três seções perpendiculares entre si (uma delas paralela ao acamamento) e aplicação do método algébrico de Shimamoto & Ikeda (1976). A análise tridimensional realizada mostrou claramente a inexistência de sistemáticas relações entre o elipsóide de *fabric* e o acamamento e entre a profundidade de soterramento do sedimento e a intensidade do *strain*. Seymour & Boulter (1979) estudaram seções perpendiculares ao acamamento de rochas sedimentares não deformadas e com marcadores mensuráveis. Os autores concluíram que as diferenças radicais nas características do *fabric* em diferentes seções de cada espécime acabam por embutir um grande erro na determinação da influência da compactação no elipsóide final de deformação.

Considerando-se estes trabalhos, alguns pontos devem ser levados à tona quando da análise quantitativa da deformação em rochas metassedimentares:

- a. Grãos individuais não são necessariamente esféricos antes da deformação tectônica;
- b. Raramente existe distribuição uniforme inicial dos grãos e, em boa parte dos exemplos, nem mesmo em cortes paralelos ao acamamento;
- c. A “assimetria de *fabric*” com relação ao acamamento é rara;
- d. Análises de deformação baseadas na forma ou orientação dos grãos com baixo R_f (menor que 1,5) refletem, em sua maior parte, o *fabric* deposicional.

Do exposto, fica clara a ineficácia de alguns métodos de correção dos efeitos deposicionais/diagenéticos. Cita-se como exemplo o método de aproximação algébrica proposto por Wheeler (1986) para a decomposição do elipsóide final em um elipsóide tectônico superposto a um elipsóide primário. A correção parte de um pressuposto não verificável, que é a existência de *fabric* simétrico em relação ao acamamento.

A despeito das limitações, Peterson & Yu (1994) sugerem que, na maioria dos casos, seja possível a multiplicação do elipsóide final por uma média recíproca de elipsóides primários previamente conhecidos. Na impossibilidade de sua determinação na região em estudo, valores bibliográficos tornam-se aceitáveis, a exemplo de (1,31 : 1,14 : 1,00) para arenitos (Peterson & Yu, *op. cit.*). Fica claro, portanto, que a análise quantitativa da deformação em rochas metassedimentares depende não apenas de uma boa amostragem, mas também de evidências sobre o grau de influência sedimentológica na esfericidade e disposição dos grãos, seja por observações diretas, indiretas ou valores bibliográficos. De posse de tais informações, os parâmetros podem ser determinados por diferentes *softwares*, sempre atentando para possíveis restrições (Lopes-Silva *et al.*, 2005).

6.2 – A ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO NA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL

São escassos os trabalhos de quantificação da deformação em rochas da Serra do Espinhaço Meridional, o que se deve à conjunção de diferentes fatores, dentre os quais:

- a. Dificuldade intrínseca aos métodos de quantificação;
- b. Pelo menos parte dos terrenos que constituem a serra apresenta evolução tectônica policíclica, o que torna a aplicação dos métodos e a interpretação dos resultados ainda mais complexa;
- c. Ausência de fósseis, que muitas vezes permitem quantificação mais segura da deformação pelo conhecimento de sua geometria no estado não deformado.

Os primeiros trabalhos de quantificação da deformação na serra se devem a Silva & Uhlein (1985) e Kalt (1991) que se concentraram em três afloramentos isolados de metaconglomerados, efetuando a análise da deformação dos clastos. O único trabalho de cunho regional foi desenvolvido por Knauer (1999) que quantificou a deformação em quartzitos dos grupos Costa Sena e Guinda nas folhas Diamantina e Presidente Kubistchek através de diferentes métodos. Sob a mesma ótica, focando parte da Quadrícula Guinda, Cordeiro (2008) desenvolveu estudos de quantificação detalhados na Formação Bandeirinha e principalmente no Grupo Guinda, atendo-se basicamente aos quartzitos das unidades. Para maiores detalhes sobre os métodos de quantificação e sua aplicação no setor meridional da Serra do Espinhaço sugere-se fortemente a leitura destes trabalhos, em especial Knauer (1999) e Cordeiro (2008).

As atividades de quantificação da deformação exercidas nesta dissertação têm caráter local e são admitidas como ferramentas complementares na questão central abordada: o posicionamento estratigráfico da Formação Bandeirinha. Embora local, os resultados obtidos podem ser interessantes tanto na abordagem do trabalho quanto no sentido de fomentar novas pesquisas de cunho semelhante, mas de abrangência mais ampla, conforme será posteriormente explanado.

6.3 – ESTUDO DE CASO: A QUANTIFICAÇÃO DA DEFORMAÇÃO EM CLASTOS DO NÍVEL A DA FORMAÇÃO SÃO JOÃO DA CHAPADA

6.3.1 – GENERALIDADES

Diversos afloramentos de metarruditos do Nível A da Formação São João da Chapada se caracterizam por conter arcabouço formado por clastos de cor rosa a vermelha que indicam retrabalhamento da Formação Bandeirinha (item 4.4.1). Uma das melhores exposições destas rochas ocorre na Seção D, a oeste da Serra da Miúda, onde os clastos estão ora orientados segundo a foliação da matriz (S_n), ora desorganizados (Figura 6.3.1). Estes clastos são quase sempre bem estratificados e apresentam uma foliação muito bem marcada, paralela ao acamamento (S_{n-1}/S_0).



Figura 6.3.1. Afloramento de metarrudito do Nível A da Formação São João da Chapada. Clastos da rocha foram utilizados para análise quantitativa da deformação. S_n da matriz: 100/45. Coordenadas UTM (X, Y, Z em metros): 638.090, 7.974.066, 1.405. Orientação da foto: E-W.

Cinco clastos do metarrudito foram coletados e analisados em dezoito lâminas petrográficas, a partir das quais obtiveram-se os parâmetros R_f e φ . O objetivo do trabalho foi verificar a direção e sentido do maior estiramento dos grãos em cada clasto e traçar um paralelo com a deformação observada para o Supergrupo Espinhaço (com vergência conhecida para oeste, conforme Knauer, 1999 e Cordeiro, 2008). Dois possíveis resultados são prontamente aventados:

- a. Os resultados de R_f e φ para os clastos apontam para uma vergência no sentido oeste, concordando com os valores encontrados no Supergrupo Espinhaço. Neste caso, a rocha-fonte do metarrudito (Formação Bandeirinha) pode ter sofrido apenas a(s) deformação(ões) atuantes sobre o Supergrupo Espinhaço ou ter sido acometida por deformações anteriores, obliteradas pela combinação de metamorfismo regional e deformação do(s) evento(s) posterior(es). Neste cenário o resultado é inconclusivo no que se refere à definição estratigráfica da unidade;
- b. Os valores de R_f e φ são dispersos para cada clasto, com vergências para diferentes quadrantes. Nesta situação é grande a possibilidade de a rocha-fonte já ter sido retrabalhada em estado deformado, o que geraria uma disposição randômica dos clastos e, conseqüentemente, dos elipsóides de deformação a eles relacionados. Esta hipótese indicaria que a Formação Bandeirinha fora depositada e deformada antes do Grupo Guinda, excluindo a possibilidade de terem sido geradas em uma mesma tafrogênese.

6.3.2 – AMOSTRAGEM

O processo de quantificação da deformação deve ser extremamente criterioso, dado que são muitas as limitações inerentes aos métodos. Os desvios são cumulativos, e têm o mesmo impacto ao final da análise, sejam eles provenientes da amostragem ou da execução do método propriamente dito. Desta forma, a amostragem dos clastos foi realizada com a maior acuracidade possível. Os fragmentos em geral apresentam bons planos de quebra (foliação paralela ao acamamento), que foram utilizados para a coleta orientada. Para cada clasto amostrado foram medidos os planos de foliação e as lineações associadas. Estas últimas foram utilizadas na seleção dos planos de laminação (Figura 6.3.2).

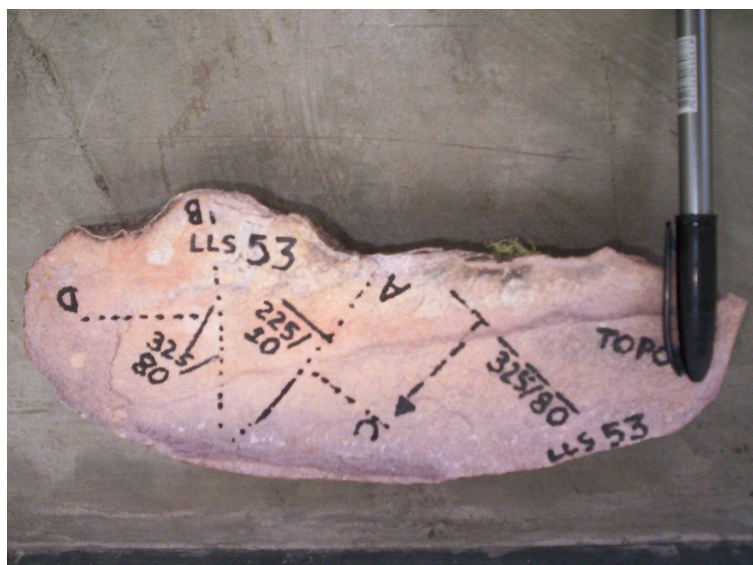


Figura 6.3.2. Exemplo de clasto amostrado (LLS 53) com marcação do plano de foliação e das seções a serem laminadas (A a D).

6.3.3 – ANÁLISE DAS LINEAÇÕES NOS PLANOS DE FOLIAÇÃO

Os planos de foliação dos clastos comumente discordam da foliação da matriz do metarrudito, de atitude em torno de 100/45. Apesar disso, é notável a existência de lineações de estiramento de atitudes dispersas nestes clastos, por vezes muito evidentes, em outros casos de difícil percepção. Ressalta-se que estas lineações se destacam ainda mais nos clastos cujos planos S_{n-1} se paralelizam à foliação S_n da matriz. Neste caso é intuitivo imaginar que as estruturas se desenvolveram na matriz e no arcabouço durante o(s) mesmo(s) evento(s) tectônico(s) que afetara(m) o Supergrupo Espinhaço.

É até certo ponto intrigante a ocorrência de lineações de estiramento nos clastos com atitudes que não concordam com a cinemática conhecida para o Supergrupo Espinhaço (Figura 6.3.3). Em diversos clastos é ainda possível observar duas ou três lineações distintas nos mesmos planos. A situação leva a crer, de pronto, que estas estruturas já estavam impressas nos planos da Formação Bandeirinha antes do seu retrabalhamento na Bacia Espinhaço. Entretanto, é necessário levar em consideração a possibilidade, seja ela remota ou não, de que as lineações tenham sido geradas por movimentação interestratal de natureza deposicional ou mesmo em consequência de movimento antitético dos planos dos clastos, orientados de forma contrária ao esforço tectônico (Figura 6.3.4).

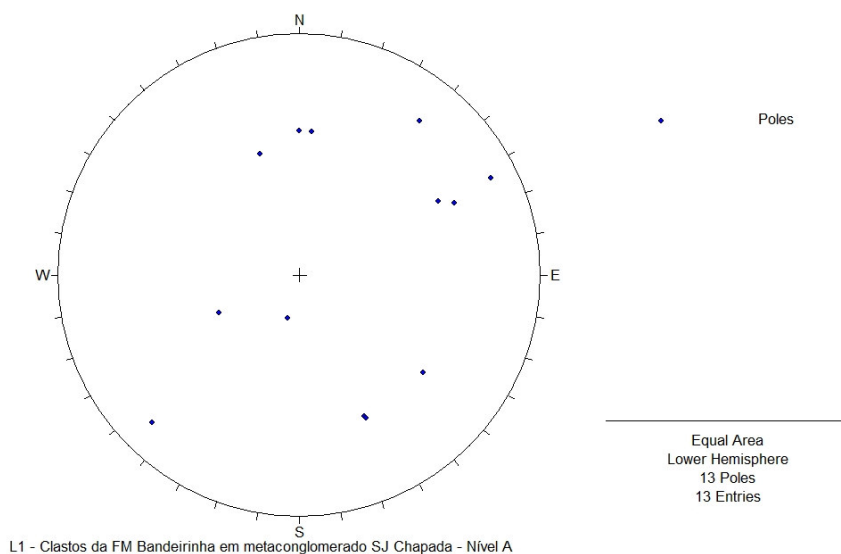


Figura 6.3.3. Diagrama estereográfico (Rede de Schmidt) para lineações de estiramento presentes em clastos do Nível A da Formação São João da Chapada.

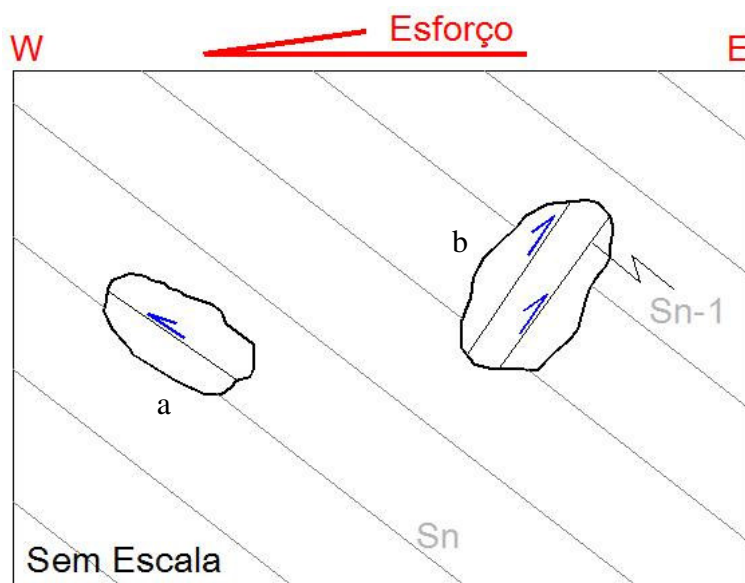


Figura 6.3.4. Figura esquemática indicando a geração de lineações em clastos de metarrudito durante esforço tectônico no sentido E-W. Em (a), plano de foliação do clasto (S_{n-1}/S_0) é sub-paralelo à foliação da matriz (S_n). Movimento de S_{n-1} gera lineações com caimento para E. Em (b), S_{n-1} discorda de S_n , e gera lineações com caimento para W devido a movimento antitético de S_{n-1} .

Foram realizados cortes paralelos e ortogonais às diversas lineações nos cinco clastos estudados.

6.3.4 – PROCEDIMENTO DE QUANTIFICAÇÃO DA DEFORMAÇÃO

A vantagem em se proceder a análise da deformação em quartzitos oriundos da Formação Bandeirinha é a característica sedimentar preservada nas rochas. Os grãos sedimentares encontram-se, via de regra, muito bem delimitados por películas de óxido de ferro, e podem ser identificados com grande segurança. Este fato nem sempre é observado para os litotipos das formações São João da Chapada e Sopa-Brumadinho, o que pode acarretar em erros, dado que por vezes é praticamente impossível o reconhecimento dos grãos devido à forte recristalização.

Após amostrados os clastos e confeccionadas as lâminas petrográficas, as rochas que os constituem foram descritas e fotografadas ao microscópio. As fotomicrografias foram efetuadas mantendo-se a superfície de referência das lâminas (plano de foliação) paralela ao fio “horizontal” do retículo. Desta forma, todas as fotomicrografias têm como “datum” esta superfície.

Impressas as fotomicrografias, os grãos sedimentares visíveis foram delimitados em *overlay* e posteriormente transformados em arquivos digitais, a partir dos quais executou-se a quantificação dos parâmetros destes grãos (Figura 6.3.5). A análise foi efetuada através do *software* ImageTool 3.00 (UTHSCSA, 2002), que fornece uma série de parâmetros para cada grão individual com base nas imagens (comprimento dos eixos, razões, ângulo com a superfície horizontal de referência, entre outros). Os dados obtidos foram então estatisticamente tratados com a determinação da razão entre os eixos (R_f) e ângulo com a superfície de referência (φ) para cada lâmina. Por fim foram gerados gráficos logarítmicos de $R_f \times \varphi$ (Anexo 04) e uma tabela síntese dos dados obtidos (Tabela 6.3.1). Admitiu-se como principal plano de deformação para cada clasto aquele que apresentou maior razão na média harmônica entre os eixos (R_f). Optou-se pela média harmônica em detrimento da média aritmética pelo fato de a primeira diluir o efeito de valores anômalos. Seu resultado, mais conservador, é sempre inferior ao da média aritmética.

Não foram determinados os parâmetros R_i , θ e os parâmetros de Flinn por fugirem do escopo proposto neste trabalho.

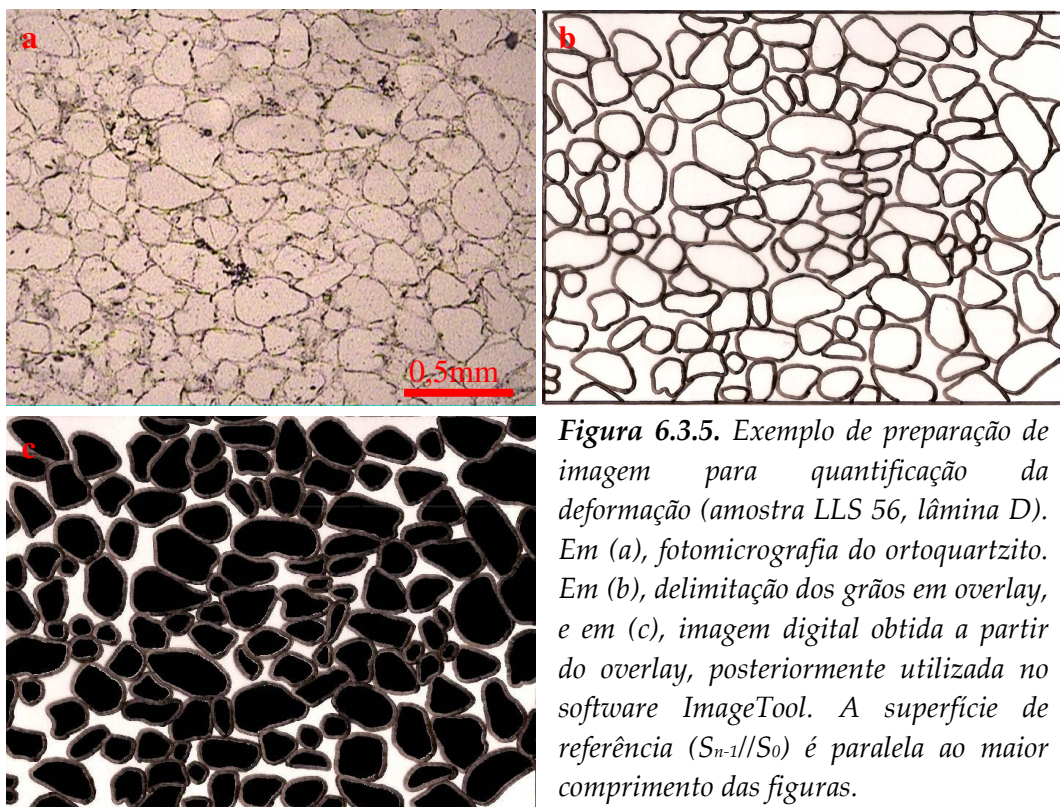


Figura 6.3.5. Exemplo de preparação de imagem para quantificação da deformação (amostra LLS 56, lâmina D). Em (a), fotomicrografia do ortoquartzito. Em (b), delimitação dos grãos em overlay, e em (c), imagem digital obtida a partir do overlay, posteriormente utilizada no software ImageTool. A superfície de referência (S_{n-1}/S_0) é paralela ao maior comprimento das figuras.

6.3.5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados detalhados obtidos para a quantificação da deformação nas dezoito lâminas estão apresentados na Tabela 6.3.1.

Nota-se que para todas as análises os valores da média harmônica de R_f são sempre superiores a 1,5. Com base nos trabalhos discutidos no item 6.1, estes números indicam que as amostras foram de fato deformadas tectonicamente, de forma que a razão entre os eixos não responde a fatores deposicionais/diagenéticos. Logo, é válido assumir que o plano com maior valor de R_f para cada amostra representa aproximadamente a seção XZ do elipsóide de deformação, correspondendo à elipse de maior razão axial. Obviamente trata-se de uma aproximação, primeiro devido ao número limitado de lâminas por amostra, e segundo pela impossibilidade de se conhecer com segurança a geometria indeformada (estado primário) dos grãos.

Espaço para Tabela 6.3.1 – Papel A3

Embora não se conheça o estado inicial dos grãos, assume-se aqui que para uma mesma amostra a sua geometria apresentava-se aproximadamente constante, seja ela esférica ou não. As características da Formação Bandeirinha, fonte dos sedimentos, apontam para a possibilidade de que os grãos tenham apresentado alta esfericidade em seu estado original. Estes são, em geral, arredondados a bem arredondados, uniformes em composição e bem selecionados e maduros, o que reforça esta hipótese. Independentemente do valor de R_i , assumindo-se que este era semelhante para todas as seções analisadas dentro de uma mesma amostra, o valor de R_f permite quantificar a deformação relativa entre estas seções. Por conseqüência, é razoável admitir que os maiores valores de R_f de fato refletem a principal elipse de deformação para cada clasto. O interesse maior deste trabalho é justamente verificar a vergência da principal elipse determinada em cada amostra, independente do valor absoluto de R_f (desde que este esteja no campo de deformação tectônica – maior que 1,5 – o que é o caso para todas as lâminas estudadas).

A amostra LLS 52 apresentou principal elipse de deformação com vergência para NE (053Az), com valor de R_f de 1,65 e φ de 25°. O plano da elipse é paralelo à principal lineação determinada na amostra (038/20), contida no plano de foliação 099/45. Entretanto, a vergência da elipse é contrária à da lineação. Se a lineação e o estiramento dos grãos foram gerados em um mesmo evento, a vergência oposta indica que houve rotação da amostra (clasto) após a deformação.

Para a amostra LLS 53 obteve-se maior dificuldade na quantificação da deformação. O litotipo é micáceo e o grau de deformação é ligeiramente mais alto, o que dificultou a determinação dos grãos sedimentares em alguns pontos. A principal elipse encontrada tem vergência para NW (327Az), com R_f de 1,75 e φ de 20°. O plano da elipse é perpendicular à lineação 282/77, contida na foliação 325/80. Para esta amostra foram encontradas de duas a três populações de φ , especialmente para as lâminas A, B e C (histogramas no Anexo 04), o que pode refletir superposição de eventos de deformação e rearranjo parcial dos grãos.

A principal elipse da amostra LLS 54 verge para WNW (280Az), com valor de R_f igual a 1,73 e φ de 20°. O plano que contém a elipse é paralelo à principal lineação verificada na foliação (280/70). Assim como ocorre para a amostra LLS 52, a vergência oposta da elipse quando comparada à lineação sugere rotação da rocha após ter sido deformada.

A amostra LLS 55 apresenta plano de foliação sub-paralelo à foliação da matriz do metarrudito. Conseqüentemente, a lineação encontrada neste clasto é mais bem desenvolvida que nos demais, sendo nitidamente *down dip*. A elipse de deformação determinada paralelamente a esta lineação apresenta o maior R_f dentre todas as dezoito lâminas, com valor de 1,83 e φ de 15° , apresentando ainda um sub-máximo importante no histograma de frequência de φ . A vergência da elipse para WNW (276Az) concorda com o padrão observado para o Supergrupo Espinhaço.

A principal elipse verificada para a amostra LLS 56 apresenta vergência para SE (109Az) e φ de -16° . Duas populações de φ ocorrem para as lâminas A, B e C (Anexo 04), o que pode ser conseqüência de superposição de eventos de deformação. O plano que contém a elipse é paralelo à lineação principal, 109/47, e novamente mostra vergência contrária, donde supõe-se rotação da amostra já deformada, a exemplo da LLS 52 e LLS 54.

Dos resultados descritos acima, constata-se imediatamente completa dispersão das elipses representadas por cada clasto (Figura 6.3.6).

Apenas para a amostra LLS 53 não se observa relação direta entre a lineação mais evidente no clasto e a principal elipse de deformação, o que pode estar relacionado à existência de diferentes populações de φ , refletindo a incidência de mais de um evento tectônico. As amostras LLS 52, 54 e 56, por apresentarem vergência contrária entre lineação e principal elipse de deformação, constituem forte evidência de que a rocha-fonte dos sedimentos encontrava-se deformada antes da deposição. O processo deposicional teve o efeito de dispor de maneira aleatória os fragmentos já deformados (Figura 6.3.7). Ressalva deve ser feita apenas para a amostra LLS 54, cuja vergência da elipse concorda com o padrão do Supergrupo Espinhaço. Neste caso, não se descarta a possibilidade de os grãos estarem orientados como efeito do(s) evento(s) deformador(es) do supergrupo, embora a posição da elipse com vergência para WNW possa ser apenas uma coincidência.

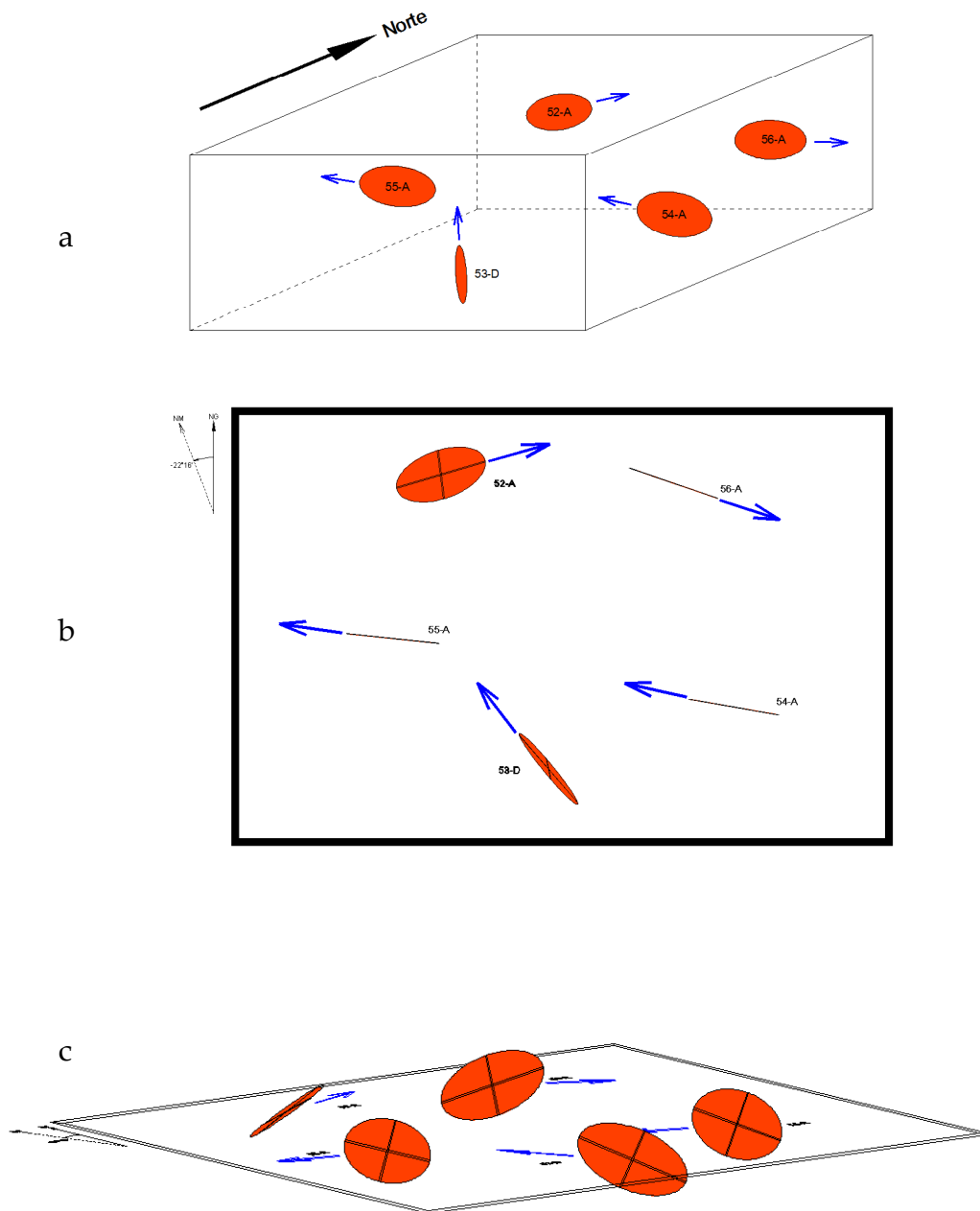


Figura 6.3.6. Representações tridimensionais (a, c) e bidimensional (b) das elipses principais de deformação determinadas para os clastos analisados. Setas azuis indicam vergência. As figuras ilustram a dispersão das elipses, que concordam com a deformação do Supergrupo Espinhaço apenas nas amostras 54 e 55.

Nos locais onde os clastos estão rotacionados de forma a sub-paralelizar o S_{n-1} (fragmento) e o S_n (matriz) existe forte tendência de os grãos dos clastos refletirem a deformação da matriz (Figura 6.3.7). A hipótese se sustenta nos resultados obtidos

para a amostra LLS 55, onde o paralelismo entre a foliação do clasto e da matriz promove o desenvolvimento de lineação de estiramento muito evidente em S_{n-1} e estiramento dos grãos com vergência concordante com a lineação. Embora esta vergência concorde com a deformação do Supergrupo Espinhaço, a ocorrência de um sub-máximo de φ sugere que os grãos sedimentares encontravam-se anteriormente deformados.

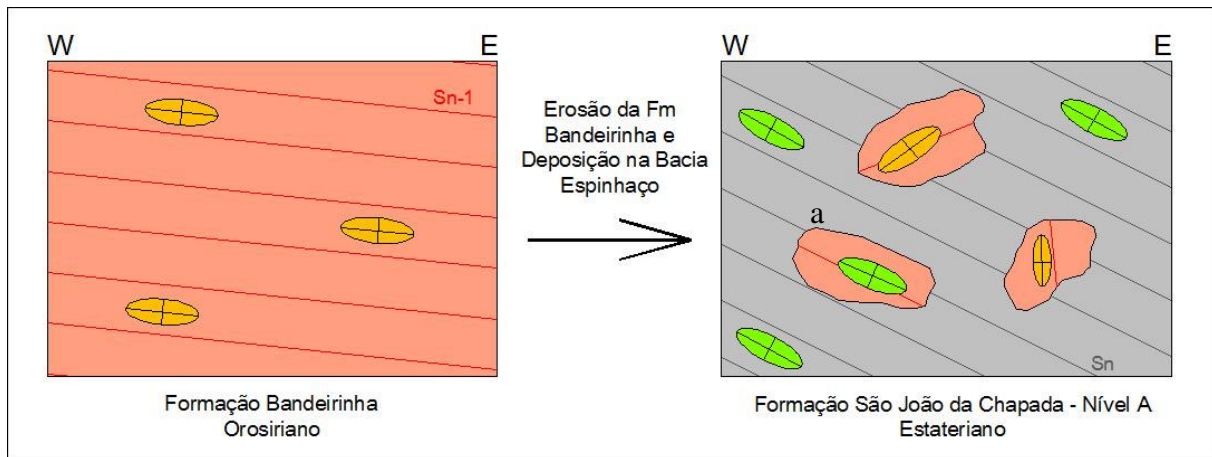


Figura 6.3.7. Síntese interpretativa dos resultados obtidos através da quantificação da deformação nos clastos. À esquerda, Formação Bandeirinha deformada durante o Orosiriano com desenvolvimento da foliação S_{n-1} e elipsóides com suposta vergência para os quadrantes oeste (em amarelo). A unidade é parcialmente retrabalhada e depositada na Bacia Espinhaço durante o Estateriano (direita). A deformação do Supergrupo Espinhaço durante o Uruçuano e/ou Brasileiro promove a formação da foliação regional S_n e dos elipsóides típicos do supergrupo, com vergência para oeste (em verde). Clastos da Formação Bandeirinha no Nível A preservam parcialmente o registro da deformação orosiriana. Em (a), S_{n-1} é sub-paralelo a S_n e o clasto registra preferencialmente o estiramento dos grãos segundo a deformação do Supergrupo Espinhaço (e.g. amostra LLS 55).