

Grupo F1:

As falhas F1, em geral, têm como direção de strike valores em torno do eixo E-W, preferencialmente WNW-ESE, com mergulhos altos (acima de 50°), são penetrativas e preservam planos de falha planares e regulares, sem preenchimento.

Essas estruturas F1 afloram bem no sillimanita-biotita-gnaiss do Grupo São Fidélis. O paragnaisse São Fidélis geralmente aflora intensamente intemperizado, mas seu arcabouço estrutural ainda é identificável, especialmente devido ao contraste entre camadas biotíticas e camadas ricas em sillimanita. Dessa maneira, foi possível identificar que as falhas F1 causaram arqueamentos na foliação adjacente, associados ao arrasto dúctil.

A cinemática das falhas F1 é reversa, com indícios de componente dextral em algumas estruturas, e gera um deslocamento relativo entre os blocos de centímetros a poucas dezenas de centímetros (Figura 53).

Nos lugares em que os planos de falha são melhor preservados, as estrias ficam bem expostas no espelho de falha (Figura 54). As estrias medidas tem caimento médio de 30° para SE, em sua maioria.

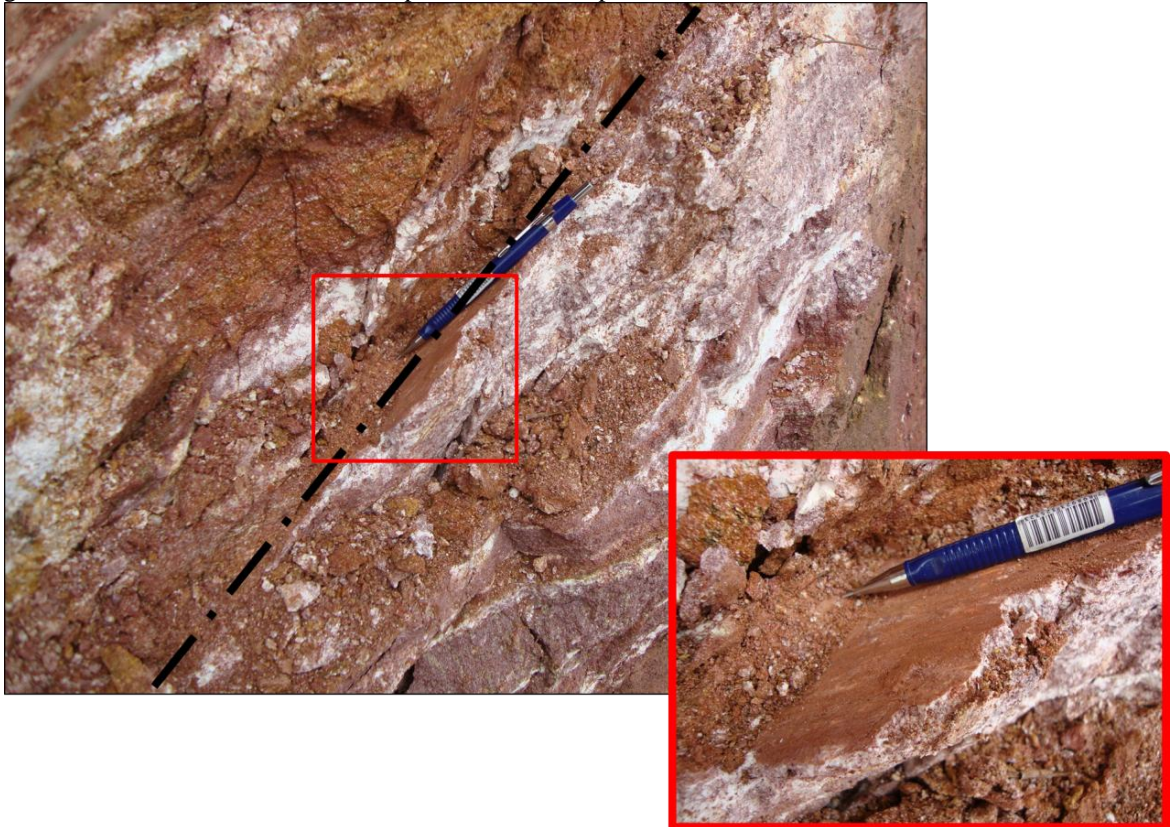
Uma ocorrência de uma falha formada em ambiente rúptil-ductil mas com orientação e movimento aparente discordante foi identificada. Essa estrutura possui cinemática normal e uma orientação aproximadamente N-S, com rejeito decimétrico, e, da mesma forma que as falhas F1, gerando arrasto na foliação adjacente. Quando analisada em conjunto com as falhas F1, o campo de esforços que deu origem a estrutura é compatível com o campo estimado para as falhas F1. Por essa razão, a despeito de sua orientação singular a estrutura em questão foi incluída no grupo F1.

Figura 53 - Falhas F1 causando arqueamento na foliação adjacente



Legenda: Falha reversa WNW-ESE (tracejado preto) no paragnaisse São Fidélis, gerando dobras de arrasto (tracejado branco) na foliação adjacente à estrutura. Deslocamento relativo de 40cm marcado por camadas mais claras (bandas leucocráticas caulinizadas). Perfil NW-SE: Ponto MR-AGMM-40.
Fonte: A autora, 2017.

Figura 54 – Plano de Falha F1 e estrias preservadas em espelho de falha.

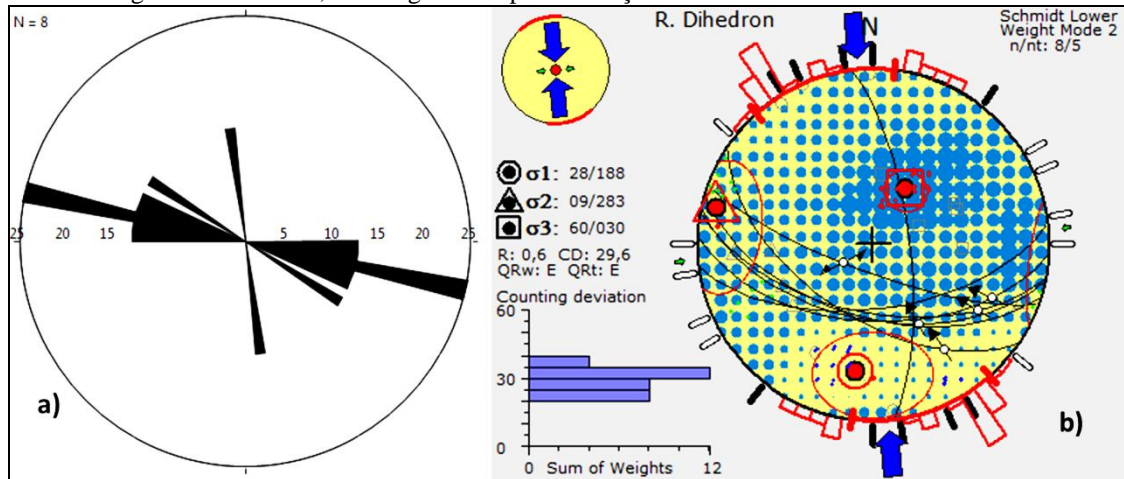


Legenda: Falha F1 (ENE-WSW, em preto) cortando o paragnaisse sillimanítico do Grupo São Fidélis, com espelho de falha preservando estrias. Zoom em vermelho nas estrias preservadas no plano de falha.
 Fonte: A Autora, 2017.

Os dados dessas falhas foram agrupados em diagramas de roseta, e os dados de falhas e estrias foram usados para estimar os paleotensores, resultando em um σ_1 aproximadamente Norte-Sul e de baixo ângulo (188/28), e σ_3 mais íngreme (030/60), levando a interpretação que estas falhas são relacionadas a um ambiente compressivo, com um fator $R=0,6$ (Figura 55; Delvaux et al., 1995)

Não foi possível estabelecer relações claras com estruturas posteriores em campo, mas a presença de feições de formação em ambiente rúptil-dúctil, como revela o arqueamento da foliação adjacente, sugere um desenvolvimento das estruturas à profundidade definida e possuindo a idade mais antiga entre as estruturas estudadas nesse trabalho. A transição de ambiente dúctil para ambiente rúptil é estimada em torno de 10-15km de profundidade na crosta (Figura 77, Apêndice A), e as estruturas F1 não possuem registro de influência ou associação com os granitos pós-colisionais ordovicianos (como é o caso das estruturas do grupo F2).

Figura 55 – Diagramas de Roseta, estereogramas e paleoesforços de F1



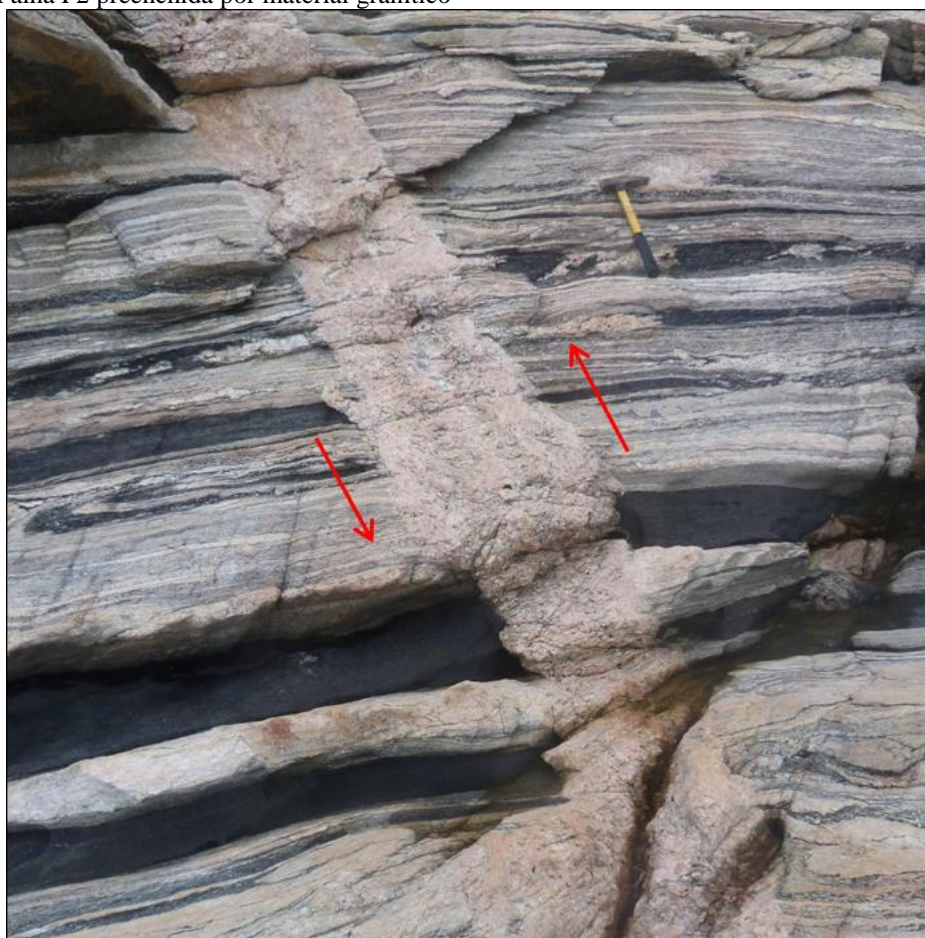
Legenda: a) Diagrama de roseta de Falhas F1. Numero de medidas: 8. Valor máximo: 25% entre 101° e 105°. Pétalas de 5° orientadas no *strike* das estruturas. b) Representação dos tensores estimados por inversão para o grupo F1, no hemisfério inferior da rede Schmidt-Lambert.

Fonte: A Autora, 2017.

Grupo F2:

As falhas F2 (Figura 56) têm direção ENE-WSW e possuem ângulos de mergulho subverticais. A característica diagnóstica desse grupo é o preenchimento por material granítico. Foram localizadas e medidas duas estruturas com essas características claras e bem preservadas. Estas estruturas cortam tanto o ortognaisse Região dos Lagos, quanto a unidade metassedimentar basal do Grupo São Fidélis.

Figura 56 – Falha F2 preenchida por material granítico



Legenda: Falha ENE-WSW deslocando o bandamento gnáissico do ortognaisse Região dos Lagos. Rejeito de aproximadamente 30cm bem marcado pelo deslocamento da camada de anfibolito. A falha reversa (setas vermelhas) é preenchida por material granítico de granulometria média a fina e tem 50cm de espessura. Perfil N-S. Ponto SQ-AGGQ-18.

Fonte: A autora, 2017.

O material leucogranítico que preenche as estruturas tem granulometria variando de fina a média, e por vezes, textura pegmatítica. A espessura do preenchimento é centimétrica, sendo a espessura máxima verificada 50cm.

A estrutura é regular e os contatos subverticais com a rocha encaixante são abruptos e planos, e não foi verificado no material magmático margens resfriadas, foliação tectônica ou de fluxo, muito embora haja movimento associado.

As estruturas apresentam uma cinemática reversa, evidenciando um rejeito decimétrico marcado pelo deslocamento do bandamento gnáissico da rocha encaixante (Figura 57).

Devido ao número reduzido de medidas para as estruturas F2, estas não foram representadas em projeções estereográficas. Os paleoesforços que deram origem a essas

estruturas não puderam ser estimados devido à ausência de dados de estrias com as quais se pudesse aplicar o método de inversão. Entretanto, fazendo uso de uma análise empírica, baseada na deformação identificada em campo na estrutura e as relações com o elipsoide de stress mais adequado, é possível estimar que o σ_1 possui orientação aproximada N-S com caimento sub-horizontal, com um σ_3 vertical.

Figura 57 – Falha F2 deslocando bandamento gnáissico



Legenda: Falha F1 reversa (seta em vermelho) com rejeito de 25cm, preenchida por material granítico fino de 10cm de espessura. A falha desloca as camadas (bem marcado pela camada quartzosa) do paragnaisse São Fidélis. Perfil NE-SW; Ponto SQ-AGMM-53.

Fonte: A autora, 2017.

Quanto à cronologia, essas falhas cortam tanto os ortognaisses paleoproterozoicos do Complexo Região dos Lagos, quanto os paragnaises superiores da sequência metassedimentar neoproterozoica do Grupo São Fidélis que afloram na área de estudo. Não foi possível estabelecer a relação cronológica clara com os diques, e outros grupos de falha, mas supõe-se que seja um dos grupos de estruturas mais antigos, devido à disponibilidade de

magma granítico para o preenchimento das estruturas. Baseado nesta característica, assume-se idade ordoviciana para estas falhas.

As características reunidas indicam que as estruturas teriam se formado pós-tectonismo Brasileiro, já que deformam as camadas metamorfizadas tanto dos ortognaisses, quanto dos paragnaisses, e podem estar associadas aos mecanismos de alojamento dos granitos pós-orogênicos. Corpos graníticos e pegmatíticos que datam do Ordoviciano foram identificados usando estruturas rúpteis pré-existentes como conduto, em regime transtensivo (Almeida et al., 2016, Valeriano et al, 2016, Valeriano et al. 2011).

Essa é, portanto, uma direção potencial para reativação por estruturas rúpteis em eventos posteriores, como é sugerido por falhas preenchidas de material cataclástico verificadas nessa mesma direção (Grupo F4).

Grupo F3:

As falhas do grupo F3 têm direção NNE-SSW a NE-SW e são preenchidas por material cataclástico e veios calcíticos (Figura 58). Os veios calcíticos são sin a tardi-falhamento, já que preenchem fraturas formadas durante o mesmo evento. As falhas F3 possuem pouco deslocamento relativo aparente, mas apresentam uma zona de dano significativa associada. São zonas de falha com 30cm a 1m de dano associado, com deslocamento relativo de até 30cm

No Ponto AGMM_59, na Praia das Conchas na cidade de Cabo Frio, as falhas F3 afloram associadas aos diques basálticos do EDSM (Figura 59). Os diques do EDSM não têm sua intrusão controlada pela estruturação herdada, como fica claro no Ponto AGMM_61 (Figura 60), onde o dique de aproximadamente 8 metros de espessura corta a encaixante, independente da zona milonítica de 10m que é cortada por ele. No ponto AGMM_59, outro dique de 1,5m de espessura tem sua borda direita falhada, com veios calcíticos de até 1mm dentro da zona de dano de poucas dezenas de centímetros. Os veios milimétricos denotam a contribuição de uma componente sinistral durante sua formação. Na parte superior do afloramento, o alojamento do dique parece ter sido controlado pela falha. Esses fatores sugerem uma contemporaneidade entre o falhamento e o alojamento do dique.

Reforçando a hipótese de falha e dique terem se formado no mesmo período, foi encontrado um minidique, segundo nomenclatura proposta por Rickwood (1990), paralelo à

falha, variando de 1 até 10cm de espessura, no ponto AGMM_58, na cidade de Armação de Búzios, RJ (Figura 62).

Figura 58 - Falha do grupo F3



Legenda: Falha F3 (preto) cortando os ortognaisses Região dos Lagos, com rejeito aparente de 30cm, com indicativos em campo de movimento Normal-Sinistral. A falha é preenchida por material brechado, e entrecortado por veios calcíticos de até 1cm. Ponto MR-AGMM-60.

Fonte: A Autora, 2017.

Figura 59: falha do grupo F3



Legenda: Falhas F3 e dique de diabásio cortando ortogneiss Região dos Lagos. Dique apresenta borda direita falhada, e na porção superior do afloramento, sua direção é controlada pela falha. Ponto AGMM_59.
Fonte: A Autora, 2017.

Figura 60: Dique EDSM cortando estruturação dúctil



Legenda: Estrutura paralela à F3 preenchida por material basáltico centimétrico. Fraturas escalonadas com mesma orientação das falhas F3, com movimentação sinistral, em concordância com as falhas. Ponto AGMM_58.

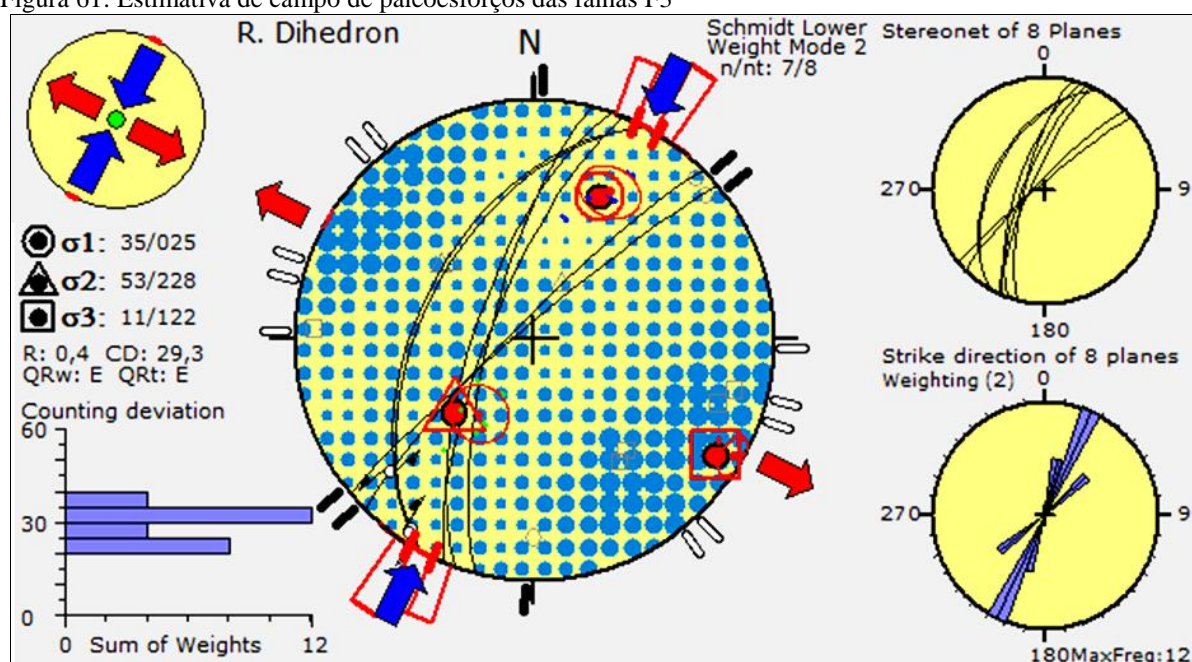
Fonte: A Autora, 2017.

As medidas das falhas, da borda falhada do dique e do próprio dique foram incluídas em uma análise da estimativa do campo de esforços à época de sua formação. Esse processo

resultou em um σ_3 (122/11) sub-horizontal e um SH_{Max} em torno de N20E, com um fator $R=0,4$, o que caracteriza um ambiente transtensivo (Figura 61).

As estruturas apresentadas na Figura 62 também tiveram seu campo de paleoesforços testado, e condizem com o campo de stress encontrado para as falhas do Grupo F3, em ambiente também transtensivo.

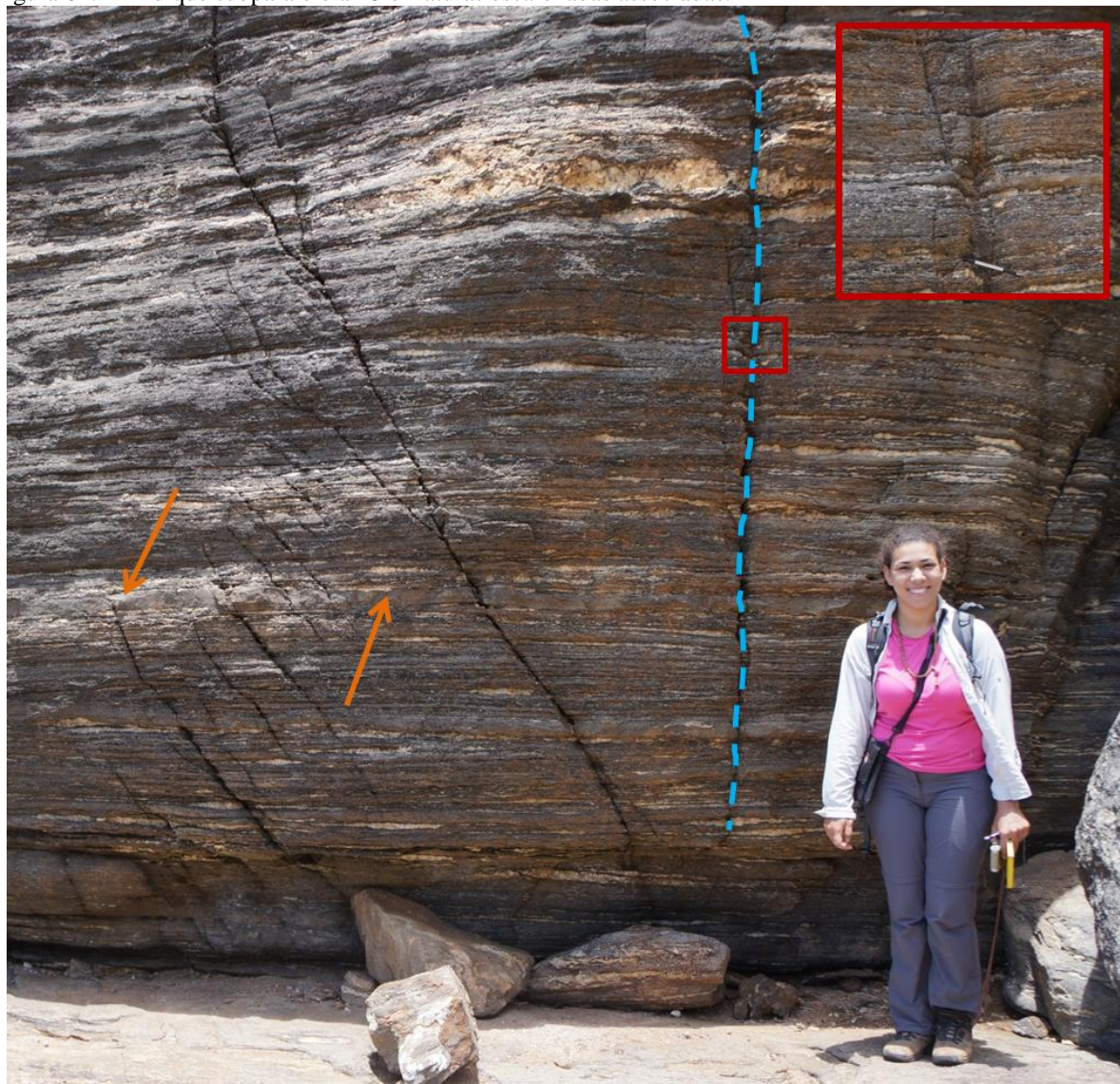
Figura 61: Estimativa de campo de paleoesforços das falhas F3



Legenda: Campo de esforços estimados para a formação das Falhas F3, incluindo medidas das falhas, da borda falhada do dique e do dique. É estimado um σ_3 subhorizontal, com um campo de esforços distensivo com componente transcorrente. A direita, no canto superior: estereograma das medidas usadas. Estereogramas plotados no hemisfério inferior, rede de Schmidt-Lambert. No canto direito inferior: diagrama de rosetas das medidas, com valores paralelos ao *strike* das estruturas e pétalas de 5°. Numero de medidas:8. Valor máximo: 25%.

Fonte: A Autora, 2017.

Figura 62: Minidique subparalelo a F3 e fraturas escalonadas associadas.



Legenda: Estrutura subparalela à F3 preenchida por material basáltico centimétrico. Fraturas escalonadas associadas a estrutura de orientação F3, com um campo de paleoesforços indicando um movimento normal. Para esse grupo de estruturas foi estimado um σ_1 (060/26) e σ_3 (150/01), com um $R=0,33$, sugerindo um campo de esforços transcorrente com componente distensiva. Ponto AGMM_58.
Fonte: A Autora, 2017.

Grupo F4:

As falhas do Grupo F4 são estruturas caracterizadas pelo preenchimento por brechas tectônicas silicificadas. As estruturas com essa direção e característica foram amplamente discutidas por diversos autores (Ferrari, 2001; Souza, 2011) dada a sua relevância regional,

especialmente no que se refere à extensão das estruturas, que pode chegar a dezenas de quilômetros (Cap. 3.2).

Essas estruturas são muito evidentes nos ortognaisses Região dos Lagos e no paragnaisse Búzios, aflorando ao longo da costa da Região dos Lagos. A maneira que as rochas de falha afloram são diversificadas, indo desde o alinhamento de blocos de brecha de tamanhos variados *in situ*, brechas muito alteradas, até um relevo positivo bem marcado pelas brechas na topografia (Figura 63).

Figura 63- Relevo positivo marcado por falha F4 preenchida por rochas de falha



Legenda: Falha do Pai Vitório, em Armação de Búzios, RJ. Falha de orientação ENE-WSW preenchida por pelo menos quatro gerações de rocha de falha, variando de brechas cataclásticas a ultracataclasitos.

Nota: Fotografia de Julio Almeida

Fonte: A Autora, 2017.

As falhas F4 que foram estudadas e descritas nesse trabalho possuem orientação ENE-WSW e altos ângulos de mergulho. Em alguns afloramentos, as falhas denotam um movimento sinistral.

O preenchimento dessas estruturas tem características e espessuras variadas. Brechas com grandes blocos angulosos do embasamento variando a ultracataclasitos (Figura 64). A espessura das brechas vai de dezenas de centímetros até dezenas de metros de zona de dano.

A zona de dano associada a essas falhas pode ser bastante extensa. Zonas de fraturas paralelas às falhas F4 afloram ao longo de toda costa. As zonas têm poucos metros de espessura, com espaçamento variando de milimétrico a centimétrico entre as fraturas no

interior dessas zonas. Em escala de afloramento, essas zonas estão espaçadas entre si algumas dezenas de metros, se repetindo ao longo dos pavimentos rochosos, e se tornando mais intensas e menos espaçadas conforme sua proximidade da falha em si.

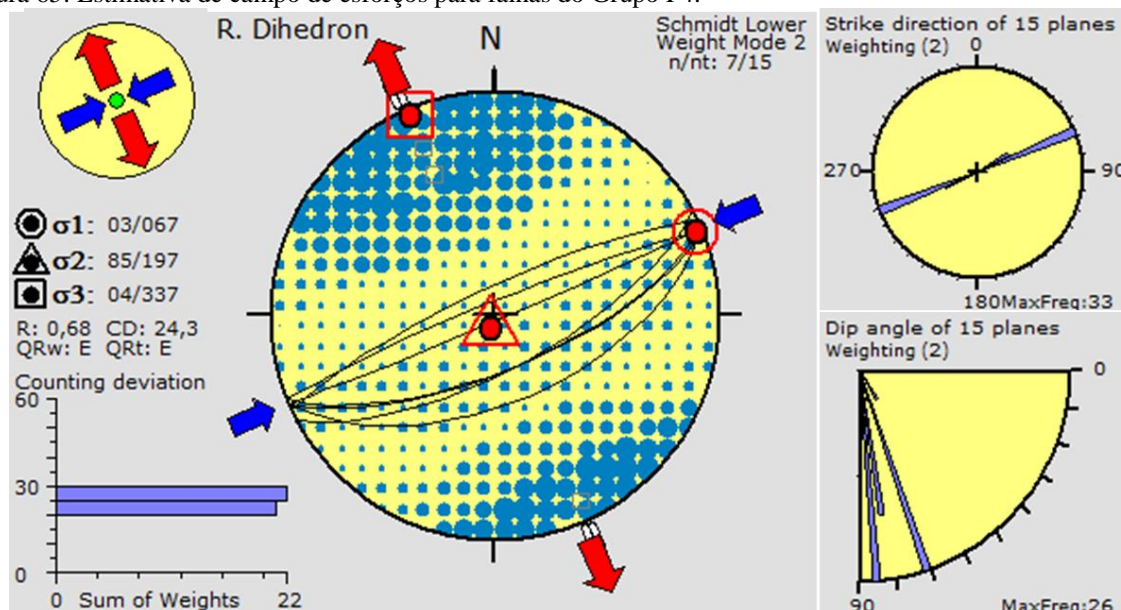
As medidas das falhas F4 foram agrupadas e o campo de esforços que deu origem a ela foi estimado (Figura 65). O resultado foi um ambiente transcorrente compressivo, com uma razão $R = 0,68$. Esse regime é marcado por um σ_3 (337/04) e um σ_1 (067/03) sub-horizontais.

Figura 64: Cataclasito associado à falha do grupo F4



Legenda: Acima: Bloco de ultracataclasito associado a falha ENE-WSW, na Praia da Ponta da Baleia, em São Pedro da Aldeia, RJ. Ponto CF_AGJA_08. Abaixo: brecha tectônica com clasto angular métrico de rocha encaixante. Falha do Pai Vitório, Armação de Búzios. Ponto AG_MM_18 (Fotografia de Julio Almeida).
Fonte: A Autora, 2017.

Figura 65: Estimativa de campo de esforços para falhas do Grupo F4.



Legenda: Campo de paleoesforços estimado para as falhas do grupo F4, resultando em um regime transcorrente compressivo (Devaulx et al, 1995), onde o σ_2 é vertical. À direita: projeção estereográfica dos planos de falha plotados em sua direção de strike e, abaixo na direita, o ângulo de mergulho dos planos de falha. Numero de medidas:15. Valor máximo:33%. Pétalas da roseta separadas em setores de 5°.

Fonte:A Autora, 2017.

Em algumas estruturas, fica evidente a existência de processos de reativação, marcados por mais de uma geração de brechas e cataclasitos e, inclusive, brechas com clastos de brechas, como é o caso da Falha do Pai Vitório, com pelo menos quatro fases de cataclase (Rubim, 2004). É importante ressaltar que o histórico de reativação dessa direção é bastante amplo, com as estruturas sendo formadas no Neocretáceo-Paleógeno, durante a implantação do Gráben da Guanabara com indícios de reativação até o Neógeno

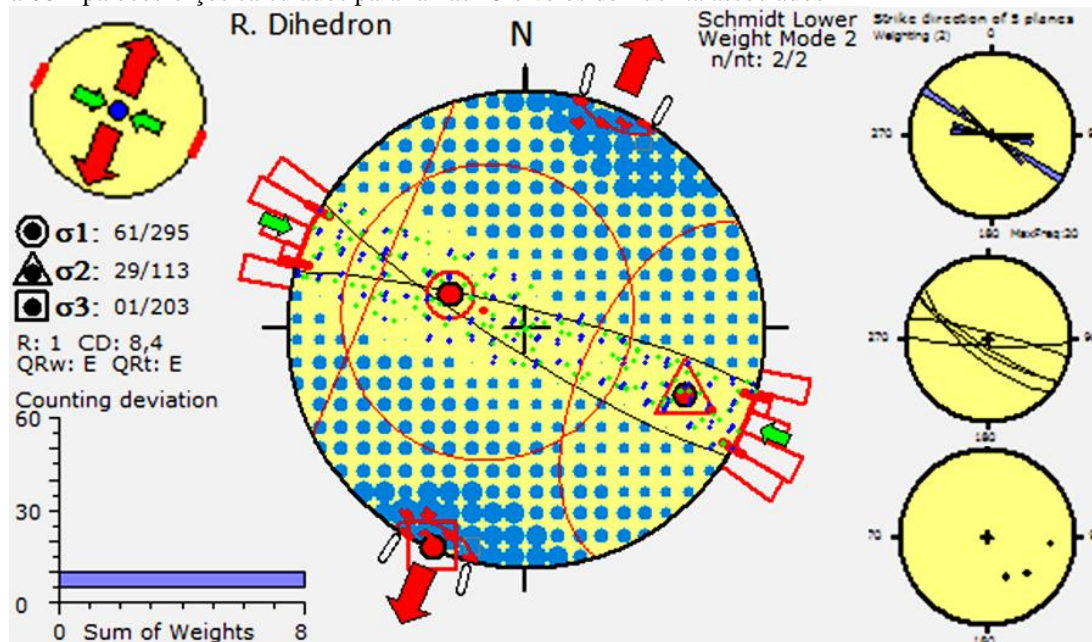
Grupo F5:

As falhas do grupo F5 foram individualizadas por se tratarem de falhas preenchidas por brechas e veios com mineralização hidrotermal, associadas diretamente ao maciço alcalino Tanguá, em Tanguá, RJ. As falhas F5 foram agrupadas aqui por resultarem em um campo de esforços estimado diferente do encontrado para as falhas do grupo F4, e estarem diretamente associadas ao maciço alcalino.

No ponto AGMM_16, realizado na área de lavra da mina de exploração de fluorita em atividade à época no Maciço Tanguá, foram identificadas falhas e veios com mineralização de fluorita e sulfetos paralelos. Os veios com fluorita hidrotermal variam de poucos centímetros até 2 metros de espessura, em sua maioria, paralelos à direção das falhas.

As falhas mapeadas tem orientação preferencial NW-SE. Algumas falhas são preenchidas por *gouge* de espessura centimétrica. Nas falhas com *slikensides* expostos, onde foram identificadas estrias, não foi possível identificar o sentido do movimento relativo entre os blocos. As estrias encontradas tem caimento de cerca de 40° para SE. O campo de esforços para a formação dessas estruturas foi estimado (Figura 66), resultando num ambiente transtensivo para a sua formação. O fator $R = 1$ obtido na configuração de paleoesforços alude a uma possível permutação entre os vetores σ_1 e σ_2 .

Figura 66 – paleoesforços calculados para falhas F5 e veios de fluorita associados



Legenda: Estimativa para os paleoesforços das falhas preenchidas por brecha e dos veios preenchidos de fluorita para o Ponto AGMM_16, em Tanguá. O resultado indica σ_3 subhorizontal (203/01) e σ_1 íngreme (295/61), com fator $R = 1$, gerando um ambiente transtrativo para a formação dessas estruturas, segundo classificação de Devaulx et al. (1995).

Fonte: A Autora, 2017.

Estudos no maciço de Tanguá indicaram uma alternância local/temporal nos campos de paleoesforços atuantes na formação das falhas e diques, com regimes direcionais NE-SW e, subsequente, NW-SE. O mais antigo teve seu início marcado por extensão N-S, que posteriormente, sofreu uma rotação anti-horária. Durante as variações dos regimes de esforços

ocorreram ainda permutações entre os três eixos de tensão principal, gerando alternância entre regime compressivo até regime puramente extensional (Ferrari, 2001). O campo de esforços transtensivo encontrado para as falhas e veios preenchidos por fluorita hidrotermal estariam relacionados a um estágio distensivo durante a fase derradeira de componente direcional proposta pelo autor.

Grupo F6:

As falhas do grupo F6 possuem orientação preferencialmente NW-SE e têm ângulos altos de mergulho. As estruturas desse grupo afloram, em geral, como regiões com efeito da ação intempérica intensa, sendo marcadas pelo relevo negativo em zonas de espessura métrica.

As estruturas F6 em sua maioria são preenchidas por material cataclástico e veios milimétricos de quartzo. Os cataclasitos, em geral, tem uma espessura variada, indo de poucos centímetros até pouco mais de 1m. O material cataclástico se apresenta em planos irregulares, associados a uma zona de dano com alguns poucos metros. No interior dessas zonas o espaçamento das fraturas varia de milimétrico a centimétrico, se intensificando com a proximidade do plano de falha. Há presença de fraturas paralelas às falhas, preenchidas por filmes de óxido de ferro.

No que se refere à cronologia, foram encontradas relações de corte entre as falhas F6 e os diques de diabásio do EDSM. Portanto, essas estruturas necessariamente atuaram posteriormente ao Eocretáceo. As características rúpteis da estrutura e seu preenchimento sugerem uma formação em ambientes mais rasos na crosta superior.

Para estimar o regime de esforços em que se formaram essas estruturas, as falhas F6 foram agrupadas e analisadas (Figura 67). A análise resultou em um ambiente transcorrente, com componente compressivo, com uma razão $R=0,79$. Os eixos de esforço principal foram estimados, sendo σ_1 e σ_3 sub-horizontais.

Riccomini et al. (2004) descrevem uma transcorrência E-W afetando a região do sudeste do Brasil, durante o Mioceno. O campo de paleoesforços aqui estimado é compatível com o sistema proposto por Riccomini (op cit.), em uma situação de compressão NE-SW. O grupo de falhas F6, portanto, pode se referir a falhas reversas associadas ao sistema transcorrente E-W descrito.