

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DIQUES CLÁSTICOS DA FORMAÇÃO TERESINA E SEU SIGNIFICADO
TECTÔNICO NO NEOPERMIANO DA BACIA DO PARANÁ

Mariana Silvatti

Orientadora: Prof. Dr. Claudio Riccomini

Co-orientador: MSc. Marlei Antônio Carrari Chamani

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2012 / 32)

SÃO PAULO

2012

Dedicatória

A tranquilidade de Ulisses

A força de Conceição

A dedicação de Teresa

E a sagacidade de Agenor

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço ao meus pais que me deram apoio e incentivaram a eu não desistir dos meus terremotos, vulcões e dinossauros. Minhas lindas irmãs que sempre me deram muita força. Aos meus orientadores Prof. Dr. Claudio Riccomini e MSc. Marlei Chamani (Trilô) pela oportunidade, por dividirem seus conhecimentos e pelas “broncas” quando eu estava errada ou “vagando” nas idéias, meu sincero agradecimento.

Como tenho uma lista enorme de agradecimento de pessoas que me ajudaram, desde dos funcionários que me levaram um lanchinho quando estudava metamórfica e não vi o tempo passar. Aos amigos Natalia Mendonça Rodrigues (Espanhola), Luis Felipe Amade (Flaminga), Manuela Ferreira (Pinhão) que sempre estavam prontos para a cervejinha nos momentos bons e ruins. E outros mais anônimos mas que tenho um carinho enorme.

A três grande amigos são carlences, Bruno, Natalia e Vitor, que não me olharam de cara torta quando falei que iria fazer geologia, só me responderam “divida com nós”. A Carlota minha amiga das loucuras do passado.

E ao Geólogo e grande amigo Luis Henrique Sapiensa Almeida pelo amor e por sempre me salvar nos desesperos na graduação.

Muito Obrigada.

Resumo

Diques clásticos são corpos tabulares compostos predominantemente por areia alojados em rochas hospedeiras mais resistentes. A maior parte dos diques clásticos é formada por injeção de materiais fluidizados (areia e água) em sedimentos inconsolidados, após a deposição, mas previamente à litificação, e sua gênese pode estar relacionada à atividade sísmica. Tendo em vista que a colocação dos diques é controlada pelo campo de esforços e as paredes dos diques orientam-se perpendicularmente à direção do esforço principal mínimo, os diques clásticos de injeção são considerados excelentes indicadores tectônicos. Em adição, dado o seu caráter de estruturas penecontemporâneas à sedimentação, os diques clásticos fornecem a idade absoluta de sua colocação.

O presente estudo teve como foco os diques clásticos presentes em depósitos sedimentares neopermianos da Formação Teresina, na Bacia do Paraná, expostos nos arredores da localidade de Torre de Pedra, Estado de São Paulo. Os objetivos principais do trabalho foram a caracterização da geometria, direções médias, distribuição geográfica e estratigráfica, bem como as relações dos diques com as rochas hospedeiras, de modo a se determinar as direções de esforços regionais atuantes durante a sua colocação.

Como principais resultados verificou-se que os diques são predominantemente tabulares, compostos de areia fina e foram injetados de baixo para cima, como evidenciado pela presença de ramificações ascendentes e *sills*. Os diques apresentam duas direções principais, ao redor de N20W e N50W, o que sugere a ação de um esforço horizontal máximo orientado na direção NW-SE durante a sua colocação. Em uma perspectiva regional, a colocação desses diques clásticos pode ser associada à propagação, continente adentro, dos esforços compressivos relacionados à Orogenia Cabo-La Ventana, que ocorreu na parte sul do paleocontinente Gondwana durante o Permotriássico.

Abstract

Clastic dykes are tabular bodies commonly composed of sands, lodged in a more resistant host rock. Most of these dykes are formed by injection of fluidized material (sand and water) into soft sediments and their genesis may be related to seismic activity. As the emplacement is controlled by the stress field, with the dyke wall normal to the minimum principal stress direction, the injection dykes are considered as excellent tectonic indicators. Moreover, as penecontemporaneous structures, the injection dyke furnishes the absolute age of emplacement.

This study was focused on clastic dykes hosted by sedimentary rocks of the Teresina Formation (Paraná Basin), of late Permian age, in the region of Torre de Pedra municipality, São Paulo State, Brazil. The main objectives were to characterize the geometry, mean direction, geographic and stratigraphic distribution, as well as the relationships of the dykes with host rocks in order to determine the directions of regional stresses during their emplacement.

As the main results, it was verified that the dykes are composed of fine sands, they are predominantly tabular and were injected upwards, as evidenced by the presence of ramifications and sills. The dykes have two predominant directions, around N20W and N50W, which suggest the action of a NW-SE-oriented main horizontal stress during their emplacement. In a regional perspective, the emplacement of these dikes could be associated with the propagation into the continent of the N-S-oriented compressive stresses related to the Cape-La Ventana orogeny, at the southern edge of Gondwana during the Permian to Triassic.

Sumário

1 Introdução	2
2 Localização	3
3 Objetivos	4
4 Justificativas	4
5 Revisão bibliográfica	5
5.1 Diques clásticos	5
5.1.2 Geometria dos diques	6
5.2 Relação entre diques clásticos e atividade sísmicas.....	7
5.2.1 Liquefação e fluidificação	7
5.2.2 Fraturamento hidráulico.....	8
5.2.3 Atividade sísmica	9
5.3 Outros mecanismos indutores.....	10
6 A Formação Teresina e seus enxames de diques clásticos.....	10
7 Evolução tectônica neopermiana da Bacia do Paraná	12
8 Materiais e métodos	13
9 Resultados obtidos.....	14
11 Discussão.....	33
12 Conclusão	34
13 Referências	35

1 Introdução

A análise estrutural desempenha um papel fundamental no entendimento da evolução tectônica de bacias sedimentares. Estruturas de deformação sinsedimentar são especialmente úteis para este fim, com destaque para os diques clásticos, cuja gênese pode indicar o contexto tectônico de sua formação.

Os primeiros trabalhos sobre diques clásticos remontam ao século XIX, tendo sido Diller (1890), um dos precursores dos estudos e compreensão destas estruturas em Sacramento Valley, Estados Unidos. Com o advento dos estudos de paleossismicidade, os diques clásticos tornaram-se mais relevantes (Obermeier, 1996).

No Brasil, destacam-se os trabalhos realizados na Bacia do Paraná, nas Formações Corumbataí e Teresina (Riccomini *et al.* 1992, Fernandes & Coimbra 1993, Riccomini 1995, Riccomini *et al.* (2005), Perinotto *et al.* (2008), Turra (2009).

Riccomini *et al.* (1992) descreveram os primeiros indícios de que os diques clásticos de injeção, presentes na Formação Corumbataí, estariam associados a atividades sísmicas ocorridas no Permiano. Riccomini *et al.* (2005) associaram a direção predominante dos diques (NNW a NNE) a esforços compressivos gerados na borda sul do Gondwana pela orogenia Cabo - La Ventana. Turra (2009) considerou o fraturamento hidráulico associado a atividades sísmicas o responsável pelo alojamento dos diques clásticos na Formação Corumbataí.

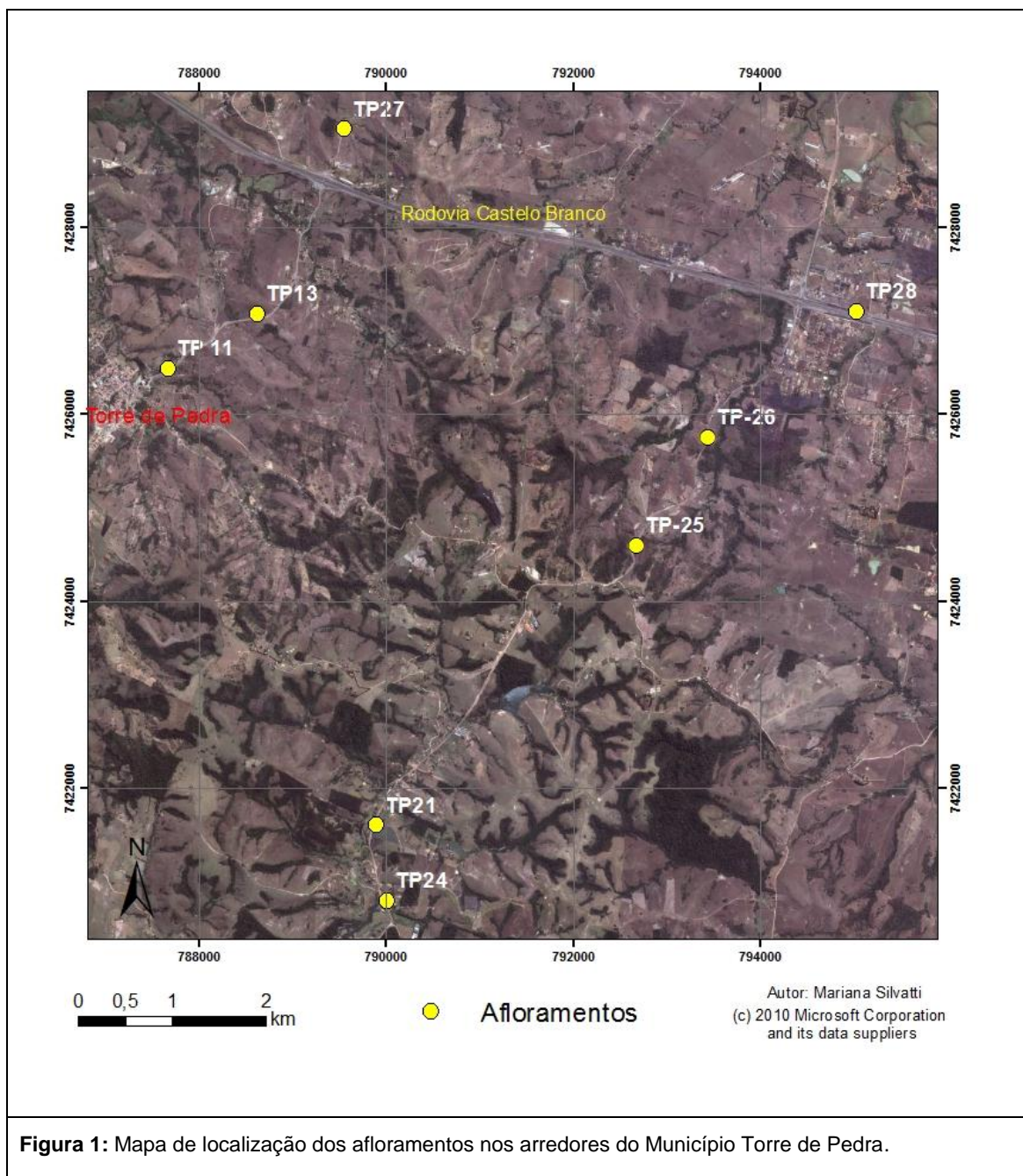
Os resultados previamente realizados na Formação Corumbataí mostraram que os diques clásticos podem ser empregados como ferramenta para a compreensão da evolução tectônica de outras porções da Bacia do Paraná.

Nos arredores de Torre de Pedra, Estado de São Paulo, Silva (2007) apresentou descrições iniciais de diques clásticos presentes na Formação Teresina, Neopermiano da Bacia do Paraná. Estes diques podem fornecer indicações importantes quanto ao paleocampo de esforços vigente durante a sua colocação, em uma região e unidade litoestratigráfica distintas daquelas estudadas em trabalhos anteriores. Para tanto, é necessária a adequada caracterização da sua gênese, mecanismos de injeção e possível correlação com campos de esforços regionais, questões essas objeto do presente trabalho de formatura.

2 Localização

O Trabalho de Formatura foi desenvolvido na região do Município de Torre de Pedra, na região centro-sul do Estado de São Paulo (Figura 1). Situado na borda leste da Bacia do Paraná, o local é caracterizado por um morro testemunho denominado de Torre de Pedra, que empresta o nome à cidade

A principal via de acesso é a Rodovia Castelo Branco (SP-280 ou BR-374), sendo vias secundárias estradas rurais pavimentadas e de terra. Os afloramentos descritos estão localizados no mapa abaixo (Figura 1).



3 Objetivos

Alguns diques clásticos presentes na Formação Teresina foram previamente descritos por Silva (2007) de acordo com as seguintes características: composição, espessura, forma e deformação. O autor também considerou que a orientação média dos diques (NW-SE), sugere a atuação de um esforço horizontal máximo de mesma direção no Neopermiano.

Além da descrição e observação elaborada por Silva (2007) referente à orientação preferencial dos diques, é necessária a obtenção de dados adicionais visando melhor correlação dessas estruturas quanto às suas possíveis gênese e mecanismo de injeção. Com isso, os objetivos pretendidos nestes trabalho são:

- caracterizar a geometria dos diques clásticos da região do Município de Torre de Pedra SP, bem como sua relação com as rochas encaixantes;
- verificar a distribuição geográfica e estratigráfica das ocorrências de diques clásticos da região;
- estimar a direção do eixo de esforço principal mínimo, σ_3 , o qual é perpendicular à orientação desses corpos;
- investigar a possível correlação entre a orientação dos diques e o campo de esforço regional atuante na Bacia do Paraná durante o Permotriássico.

4 Justificativas

Diques clásticos são de grande relevância para a compreensão do contexto tectônico de bacias sedimentares, pois, em geral, são gerados em resposta à atividade sísmica concomitante à sedimentação (Riccomini 1995). A partir do estudo de diques clásticos, Riccomini *et al.* (1992) mostraram que atividades sísmicas ocorreram no Permiano Superior da Bacia do Paraná, na Formação Corumbataí. A partir deste trabalho, o uso de diques clásticos como indicadores tectônicos estendeu-se para outras regiões da Bacia do Paraná e também para outras bacias sedimentares brasileiras (ver síntese em Chamani 2011).

As ocorrências de diques clásticos na Formação Teresina, na região de Torre de Pedra, abrem a perspectiva de melhorar a compreensão da evolução tectônica da Bacia do Paraná, uma sinéclise intracratônica, durante o Neopermiano. Em adição, representa uma oportunidade para a aluna aperfeiçoar seus conhecimentos em análise estrutural, particularmente de estruturas de deformação em sedimentos inconsolidados, sob a orientação de profissionais familiarizados com o tema.

5 Revisão bibliográfica

5.1 Diques clásticos

Diques clásticos de injeção, com formatos aproximadamente tabulares e discordantes à rocha encaixante, colocados com os sedimentos ainda não consolidados, isto é, após a deposição mas previamente à litificação. São portanto considerados como injeções penecontemporâneas à sedimentação, razão pela qual, conhecendo-se a idade das rochas encaixantes, pode-se deduzir a idade do processo de injeção.

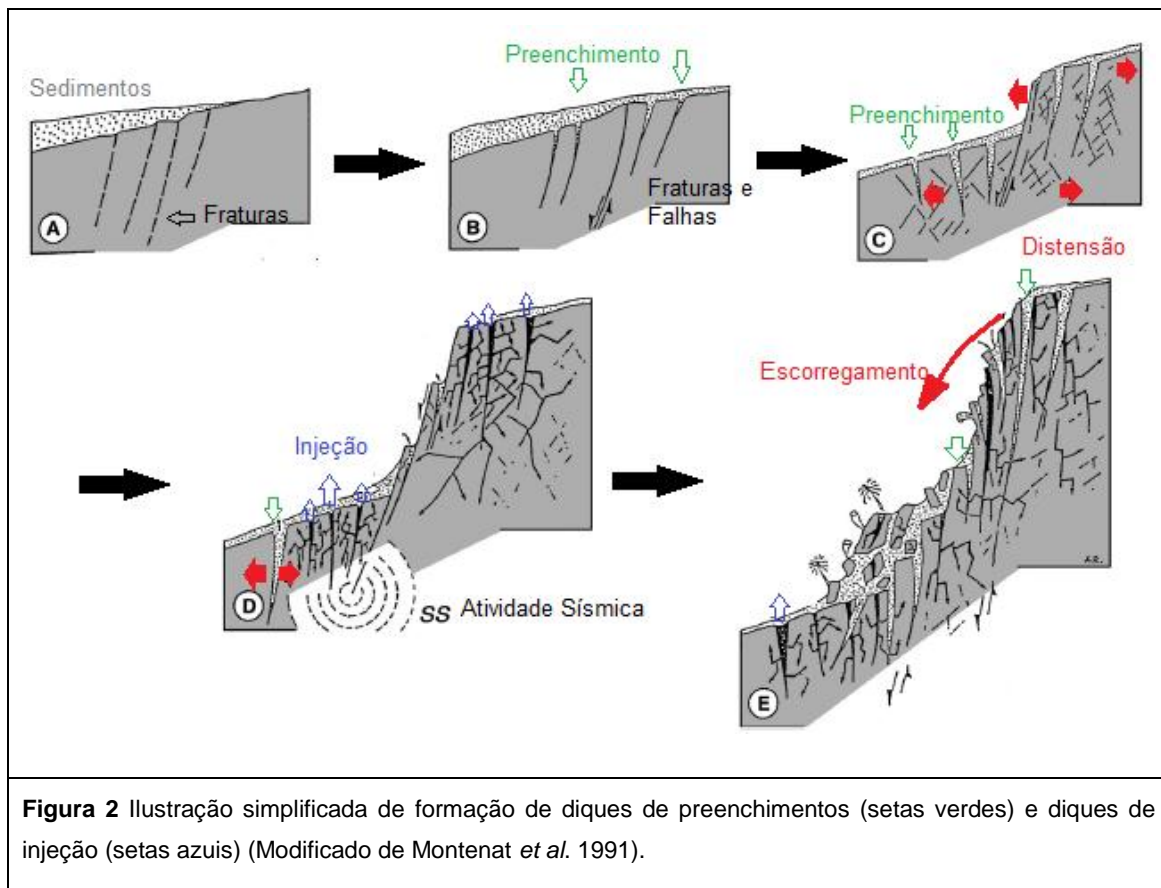
Os diques clásticos são compostos por sedimentos remobilizados de granulação variada, de argila (Zanardo *et al.* 2009) a conglomerado (Bezerra *et al.* 2005), Essa variação granulométrica resulta em texturas e estruturas variadas, porém com predomínio psamítico (arenáceo).

Os diques de rochas ígneas, como os de diabásio, que são melhor conhecidos, diferem dos diques clásticos quanto à composição e origem. Hayashi (1966), com base na gênese dos diques observados em estudos no Japão, elaborou a distinção em quatro tipos: intrusão ígnea, *squeezed-in clastic*, preenchimento e injeção. Os dois últimos são relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Diques de preenchimento, como o próprio nome diz, ocorrem mediante o preenchimento, de cima para baixo, de fraturas preexistentes por influência da ação da gravidade. Tais fraturas podem ser geradas em decorrência de escorregamentos, sobrecarga, terremotos, entre outros fatores (Montenat *et al.* 2007, Figura 2).

Diques de injeção resultam da intrusão de sedimentos fluidificados, em geral de baixo para cima (Jolly & Lonergan 2002). A injeção sob pressão comumente ocorre concomitante à passagem de ondas sísmicas, que induzem a liquefação e fluidificação dos sedimentos (Montenat *et al.* 2007) (Figura 2). Para ocorrer a injeção desses diques é necessário haver fraturas geradas por diversos mecanismos, como o fraturamento hidráulico, considerado o mais importante (Obermeier 1996). Este processo ocorre quando fluidos, como água com sedimentos, presentes nos poros da rocha ou sedimentos, passam a exercer uma pressão superior à exercida por camadas adjacentes, gerando a ruptura e intrusão do fluído.

Esses dois tipos de diques podem ocorrer concomitantemente, conforme exemplificado na Figura 2.



Os diques podem estar alojados em sucessões de diferentes ambientes sedimentares, como depósitos lacustres (Levi *et al.* 2006), glaciais (Le Heron & Ettiene 2005), fluviais (Oomkens 1966), deltaicos (Hardie 1999), marinhos profundos e turbiditos (Kane 2010). Nos ambientes glaciais, a injeção ocorre de cima para baixo, devido à pressão sobrejacente das geleiras (Jolly & Lonergan 2002).

5.1.2 Geometria dos diques

A geometria dos diques pode auxiliar na diferenciação entre diques de preenchimento e injeção.

Os diques de preenchimento não são conectados (Montenat *et al.* 2007), e sua fábrica é horizontal, caracterizados por Levi *et al.* (2006) com análises de anisotropia magnética.

As estruturas em pratos e em pilares, de fluídos de escape (Montenat *et al.* 2007) e bandamento interno paralelo à parede (Harms 1965, Levi *et al.* 2006) podem caracterizar diques de injeção, como também enxames de diques (Montenat *et al.* 2007), ramificações em direção ao topo, estruturas extrusivas na terminação superior de diques alimentadores, xenólitos da rocha encaixante e laminação da rocha encaixante deformada (Turra 2009).

A forma dos diques remete a estruturas planares, que cortam a rocha hospedeira, e esta feição pode estar relacionada à injeção destes em fraturas planares (Jolly & Lonergan 2002). Mas também são observados corpos deformados, curvilíneos, que são de difícil explicação em fraturas (Truswell 1972). Estas deformações podem decorrer de compactação sinsedimentar, fazendo com que muitas vezes os diques apareçam dobrados (Jolly & Lonergan 2002), como também injeções em rochas hospedeiras relativamente inconsolidadas (Kane 2010), ou devido a atividades tectônicas posteriores ao alojamento.

As intrusões clásticas podem ser observadas concordantes ao acamamento da rocha encaixante, na forma de sills (Jolly & Lonergan 2002). Também ocorrem estruturas extrusivas, como *vent-fractures* e vulcões de areia (Turra 2009, Hurst *et al.* 2011), as quais dificilmente são preservadas.

5.2 Relação entre diques clásticos e atividade sísmicas

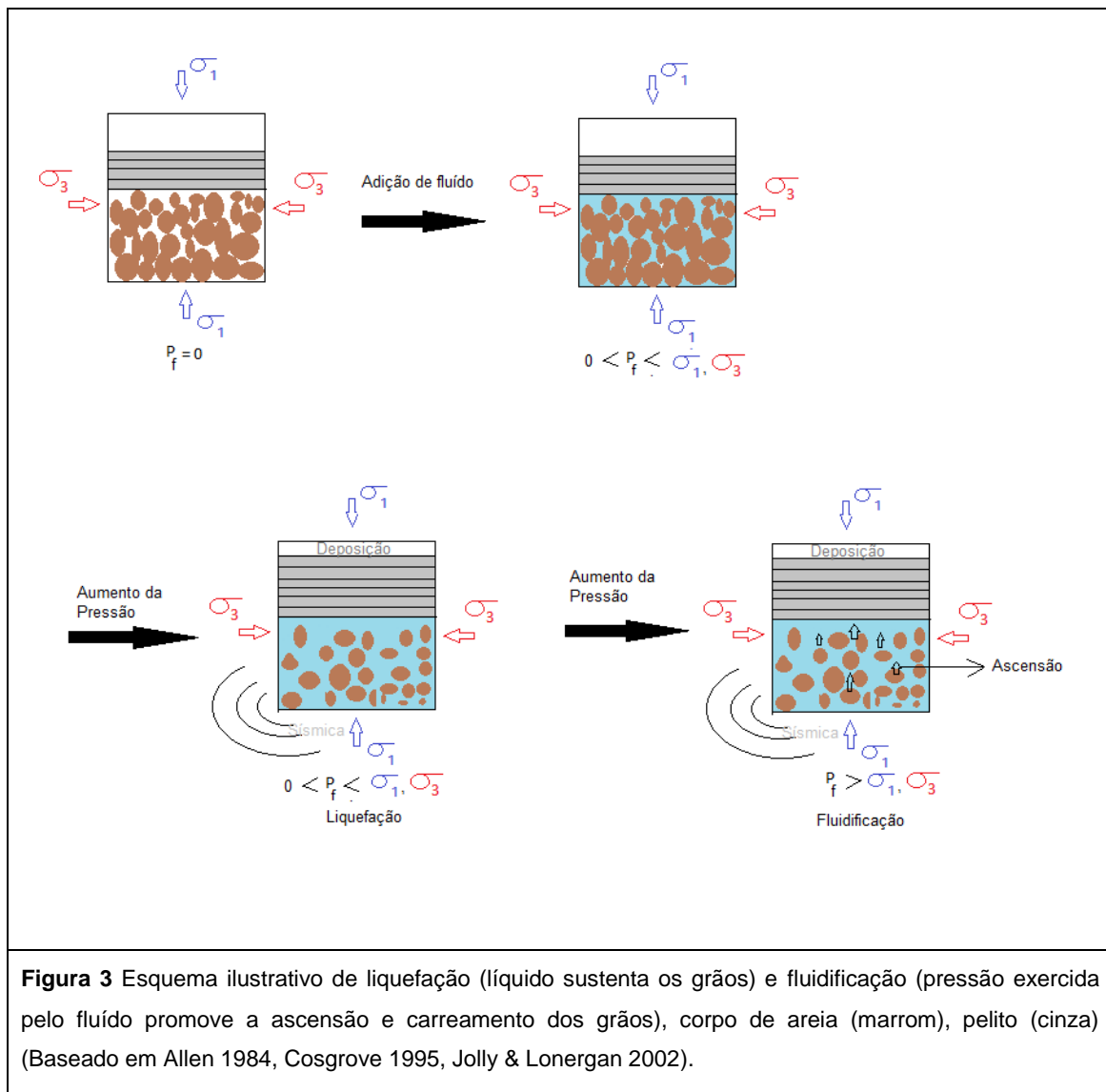
5.2.1 Liquefação e fluidificação

A geração de diques clásticos depende em resumo de três fatores atuando sobre um sedimento passível de liquefação (por exemplo, um corpo de areia com alta pressão de fluidos): a ocorrência de uma camada selante (pelito), a fluidificação da areia inconsolidada e injeção no sedimento hospedeiro (Jolly & Lonergan 2002).

Dois mecanismos são discutidos na literatura como deformadores de sedimentos inconsolidados: a liquefação e a fluidificação. Liquefação ocorre quando os sedimentos no estado sólido passam a se comportar como um líquido, perdendo a coesão entre os grãos. Entretanto, essa deformação ocorre de maneira passiva, não havendo pressão de fluidos suficiente para que grãos sejam arrastados para cima (Allen 1984) (Figura 3).

Já a fluidificação faz com que os grãos entrem em suspensão proporcionada predominantemente por um fluxo ascendente. Para ocorrer o fluxo, deve haver uma pressão diferencial que resulte numa força de arrasto maior que o peso efetivo dos grãos. No geral, pode haver fluidificação de grãos de diversos tamanhos e densidades, mas os menores, de baixa densidade, esféricos e entre camadas bem seladas são mais passíveis ao processo. Porém, quanto maior a quantidade de argila entre esses grãos mais coesos eles estarão, dificultando a permeabilidade do fluido (Jolly & Lonergan 2002).

O principal mecanismo indutor da fluidificação é a atividade sísmica (Obemeier 1996, Jolly & Lonergan 2002). Duranti & Hurst (2004) consideram o processo de fluidificação o responsável pela injeção de diques no fraturamento hidráulico.



5. 2.2 Fraturamento hidráulico

Obermeier (1996) abordou o fraturamento hidráulico como o mais importante mecanismo de fraturamento da rocha encaixante para a injeção de diques durante atividades sísmicas. O fraturamento ocorre quando a pressão de fluidos de rochas ou sedimentos ultrapassa a pressão capilar da rochas/selo adjacentes gerando sua ruptura (Jolly & Lonergan 2002), que pode ser trativa ou cisalhante. Com o aumento da pressão de fluidos, a diferença entre os esforços principais (σ_1 , σ_3) menos a

pressão de fluidos (P_f) resulta em um esforço diferencial, o que proporcionará a abertura das fraturas.

O tipo e a orientação das fraturas abertas por pressão de fluidos depende do esforço diferencial atuando sobre a rocha ou sedimento, ou seja, da diferença entre os esforços principais máximo (σ_1) e mínimo (σ_3). Se o esforço diferencial for grande (maior que $4T$, onde T é o limite de resistência à tração do material) são gerados pares conjugados de fraturas cisalhantes (Cosgrove 1995).

Para valores pequenos do esforço diferencial (menores que $4T$) são geradas fraturas trativas. Se o esforço diferencial for relativamente grande (próximo a $4T$) serão gerados arranjos paralelos de fraturas. À medida que o esforço diferencial se aproxima de zero, a orientação das fraturas se torna cada vez mais aleatória (Cosgrove 1995).

A injeção pode ocorrer em diferentes profundidades, mas já se observou que em maiores profundidades (Hurst 2011) e mais próximos a zonas de falha (Obemeier 1996) os diques formados são mais espessos.

5.2.3 Atividade sísmica

Os estudos de paleossismicidade estão diretamente relacionados aos sismitos, termo introduzido por Seilacher (1969). Em geral, sismitos estão associados a tremores de magnitude maior que 5,5 (Obermeier 1996).

A sismicidade é um mecanismo relevante para a indução à injeção de enxames de diques. Diques clásticos já são associados a antigos terremotos no estudo pioneiro efetuado por Diller (1890). Tais estruturas são particularmente úteis para análises de paleotensões, segundo Riccomini (1995).

Levi *et al.* (2011), em estudos na Ami'az Plain, situada a sudoeste do Mar Morto, observaram que a duração da injeção dos diques clásticos leva o mesmo tempo que o ciclo da passagem da onda através dos sedimentos durante os terremotos. Também concluíram que a pressão entre 1 a 2 MPa seria a responsável pela fluidificação da areia. Porém mostraram que velocidades baixas de propagação de onda, da ordem de 0,1 m/s, e pressões dirigidas de 0,1 MPa são insuficientes para promover o fraturamento hidráulico.

Diversos autores observaram que os diques estão preferencialmente orientados paralelamente à direção de máximo esforço horizontal, como por exemplo, Boehm & Moore (2002), em Santa Cruz, nos Estados Unidos.

5.3 Outros mecanismos indutores

Como outros mecanismos indutores tem sido considerados Impactos de meteoritos (Kenkmann 2003), tsunamis, que propiciam a geração de ondas (Van Loon 2009), soterramento e escorregamento (Jolly & Lonergan 2002, Kane 2010), que podem promover a fluidificação e consequente fraturamento hidráulico. Ainda, em ambientes glaciais, devido à pressão das geleiras sobrejacentes, a injeção ocorre para baixo (Jolly & Lonergan 2002). Em trabalho recente, Chi *et al.* (2012), sugeriram que diques clásticos formados por fraturamento hidráulico podem ter sido induzidos tanto por intrusões magmáticas profundas como por mudanças de temperatura.

6 A Formação Teresina e seus enxames de diques clásticos

A Formação Teresina, do Grupo Passa Dois, é composta por intercalações de arenitos muito finos de cor cinza claro com argilitos, folhelhos e siltitos com coloração cinza escuro a esverdeado. As estruturas sedimentares presentes indicam um ambiente deposicional marinho raso sob influência de ondas e da infra e supramaré (CPRM) (Figura 4). Foram também observados, na região de Fartura (SP), junto ao alinhamento Guapiara, níveis de coquina e oólitos com *hummocky* (Fernandes & Coimbra 1993).

No estado de São Paulo, abaixo da Formação Teresina encontra-se a Formação Serra Alta em contato transicional, composta de folhelhos e siltitos cinza escuro. E acima está a Formação Pirambóia, composta por arenitos eólicos.

Nas camadas de siltitos e arenitos finos intercalados da Formação Teresina, estão presentes enxames de diques clásticos, de idade neopermiana, compostos por arenitos finos, que podem estar deformados por compactação, serem irregulares ou tabulares. Os diques tem orientação predominante NW-SE (Silva 2007).

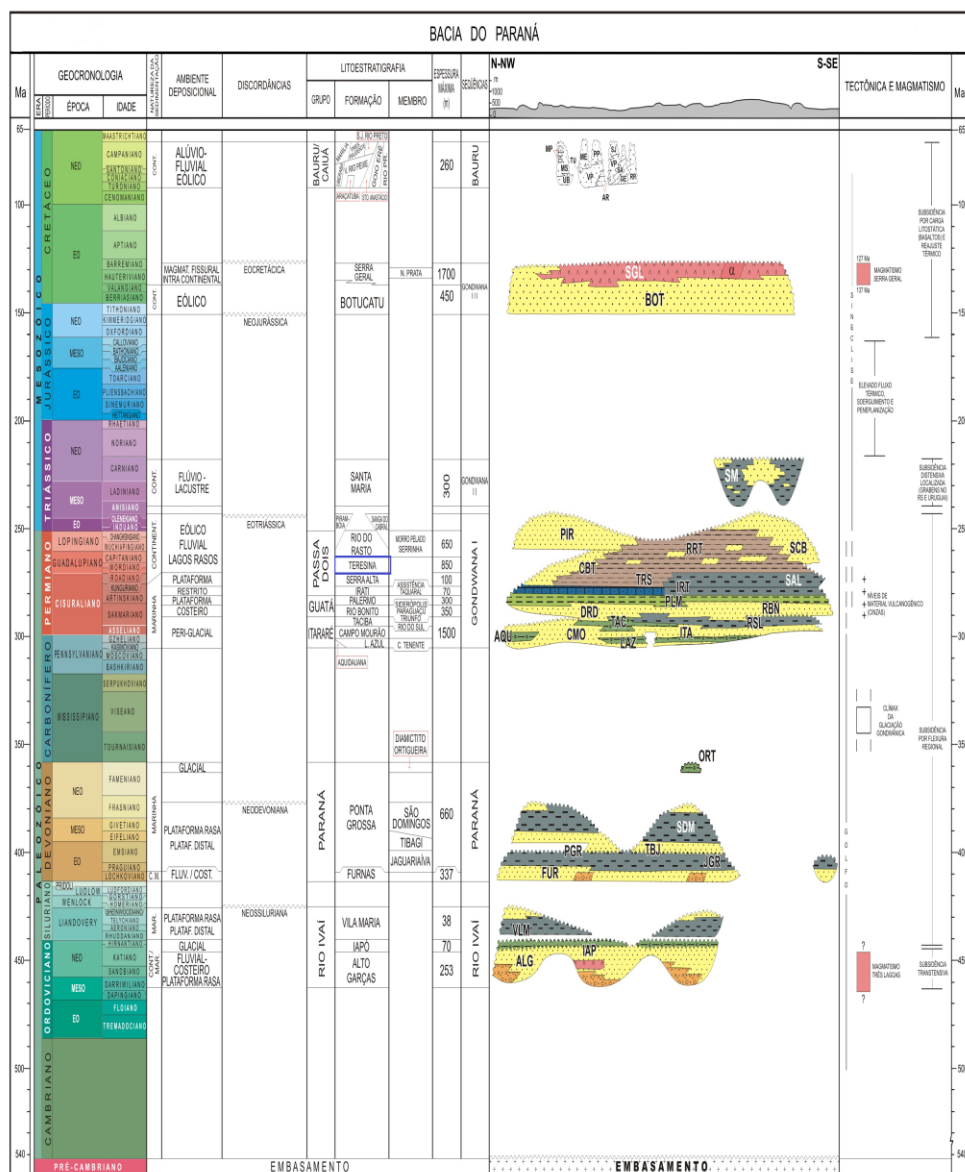


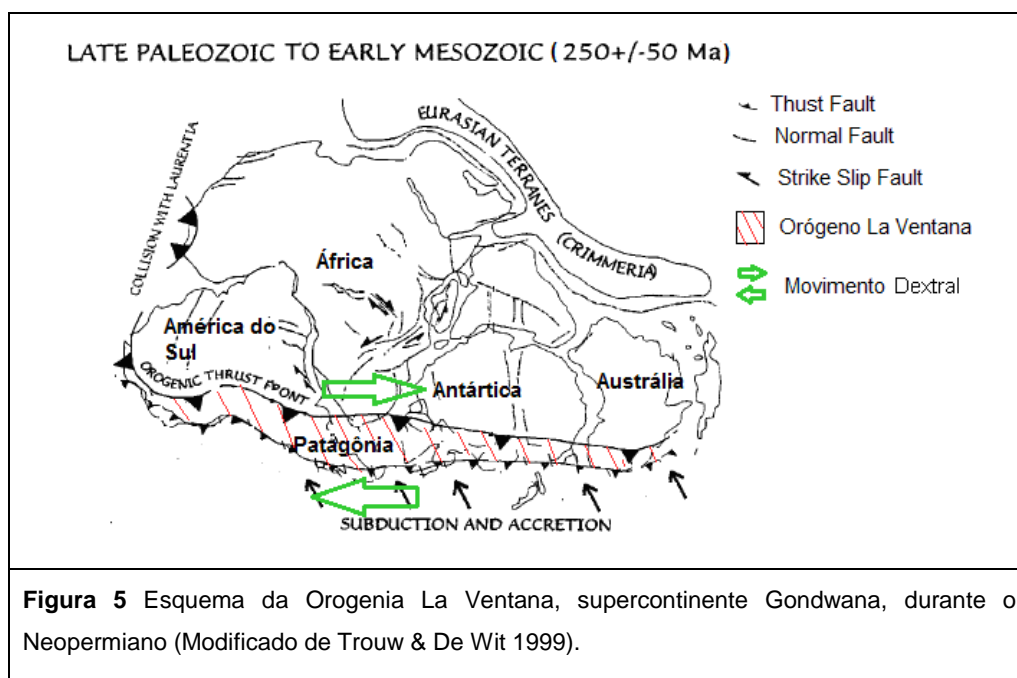
Figura 4: Carta estratigráfica da Bacia do Paraná, com destaques para a Formação Teresina (contorno azul) (Extraída e Modificada de Milani *et al.* 2007).

7 Evolução tectônica neopermiana da Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná, com aproximadamente 1,5 milhão de km² de área, está presente no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Sua formação teve início no Ordoviciano, estendendo-se até o Cretáceo (Zalán *et al.* 1990), alternando períodos de deposição e erosão. A bacia encontra-se preenchida por até cerca de 7000 metros de espessura de material sedimentar e vulcânico.

Reativações de estruturas do embasamento são observadas, exemplificadas por altos estruturais e estruturas sin-sedimentares decorrentes de atividades tectônicas (Zalán *et al.* 1990, Riccomini *et al.* 2005).

Turra (2009) associou a origem dos enxames de diques clásticos da Formação Corumbataí na região de Limeira à reativação da Zona de Cisalhamento de Jacutinga, ocasionada por esforços remotos na borda da placa. Os diques clásticos tem orientação de distensão predominante E-W, compatível com a direção N-S dos esforços compressivos da Orogenia Cabo-La Ventana (Turra 2009). Essa orogenia ocorreu no sul do paleocontinente Gondwana, pela colisão de continentes alóctones (Ramos 1984) ou por subducção de margem oceânica sob margem continental, sendo a subducção oblíqua com transcorrência dextral (Jonhston 2000) (Figura 5).



8 Materiais e métodos

O presente trabalho foi desenvolvido através de pesquisa de campo e atividades de escritório.

Nos levantamentos de campo foram coletados dados das características composicionais e geométricas dos diques clásticos, bem como das suas relações com as rochas encaixantes. Para a tomada de medidas das orientações dos diques clásticos e outras estruturas de interesse, foi utilizada a notação por rumo de mergulho.

Os afloramentos foram nomeados de TP-n (Torre de Pedra - numeração), no total de nove afloramentos. Eles estão situados na zona 22K e suas coordenadas foram obtidas em UTM com auxílio de GPS.

Os afloramentos pertencem à Formação Teresina, exceto um, que pertence à Formação Serra Alta. Nem todos os afloramentos continham diques, sendo os de números TP-11, TP-13 e TP-27 relevantes para a pesquisa, com um total de 43 medidas. Os afloramentos TP-25 e TP-26 continham um dique cada, sendo somente utilizados para na totalização dos dados.

Foram observadas também corpos tabulares e acunhados de silexites similares a diques clásticos, mas cuja gênese provavelmente não está relacionada a estes e portanto fogem aos objetivos do presente Trabalho de Formatura. Para estas estruturas foram coletadas 13 medidas, nos afloramentos TP-21 e TP-24.

No escritório foi feita uma revisão bibliográfica referente aos diques clásticos, analisando fatores como características composicionais e geométricas, gênese e mecanismo de indução. Também foi estudada a evolução neopermiana na Bacia do Paraná, com ênfase na Formação Teresina.

Cartas magnetométricas elaboradas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) foram analisadas com o objetivo de identificar possíveis estruturas do embasamento na região estudada da Bacia do Paraná.

Os dados coletados em campo foram sistematizados com o intuito de viabilizar uma melhor compreensão de características e estruturas, possibilitando uma análise da orientação preferencial dos diques. Foi feita também a ponderação das orientações pela espessura dos diques, de forma a evidenciar se há relação entre essas variáveis. Para tanto, foi utilizado o programa OpenStereo, que é um software livre para análise estrutural desenvolvido na Universidade de São Paulo (Grohmann & Campanha 2010).

A partir dos dados das orientações dos diques clásticos dos afloramentos TP-11, TP-13 e TP-27 foram confeccionados diagramas em roseta para as orientações e orientações ponderadas pela espessura dos diques clásticos, bem como diagramas de isofrequências. Foram confeccionados também diagramas em roseta e de isofrequências para a soma dos dados destes três afloramentos, adicionando-se ainda medidas isoladas obtidas nos afloramentos TP-25 e TP-26.

Os mesmos processos foram repetidos para o afloramento TP-28, que corresponde a Formação Serra Alta, somente para fins comparativos, com também para os afloramentos TP-21 e TP-24 que contêm as estruturas silicificadas.

9 Resultados obtidos

9.1 Formação Teresina

Na área de estudo afloram sedimentos pertencentes à Formação Teresina, composta predominantemente por argilitos estratificados e laminados, de coloração avermelhada a arroxeada com porções esverdeadas. Ocorrem também camadas e lentes de arenitos amarelados muito finos a médios, com estrutura planar e presença de *climbing ripples* e marcas onduladas, bem como camadas de silexitos. Leitos fossilíferos estão presentes, como no afloramento TP-13, o qual contém escamas ganóides e provavelmente dentes de tubarões, e um possível tronco de árvore no afloramento TP-26.

Os afloramentos observados apresentam em geral um único nível com diques clásticos (Foto 1 a e b), exceto o afloramento TP-27 onde é possível observar dois níveis distintos (Foto 2). Os diques são compostos por areia muito fina a fina, com forma aproximadamente tabular. Alguns diques contêm xenólitos de argilito. No afloramento TP-13 observa-se diques ramificados para cima, evidenciando injeção de baixo para cima (Foto 3). Muitos diques apresentam-se contorcidos em formas enterolíticas (Foto 5) por efeito de compactação diferencial e comumente observam-se dobras de arrasto nos argilitos junto ao contato com os diques

No afloramento TP-25 observa-se que um dique intrude parcialmente uma lente de arenito com estratificação parcialmente deformada por liquefação (Foto 4), formando pequenas dobras recumbentes.



Foto 1a: Nível com diques clásticos no afloramento TP-11



Foto 1b: Diques clásticos (setas azuis) em um mesmo nível.

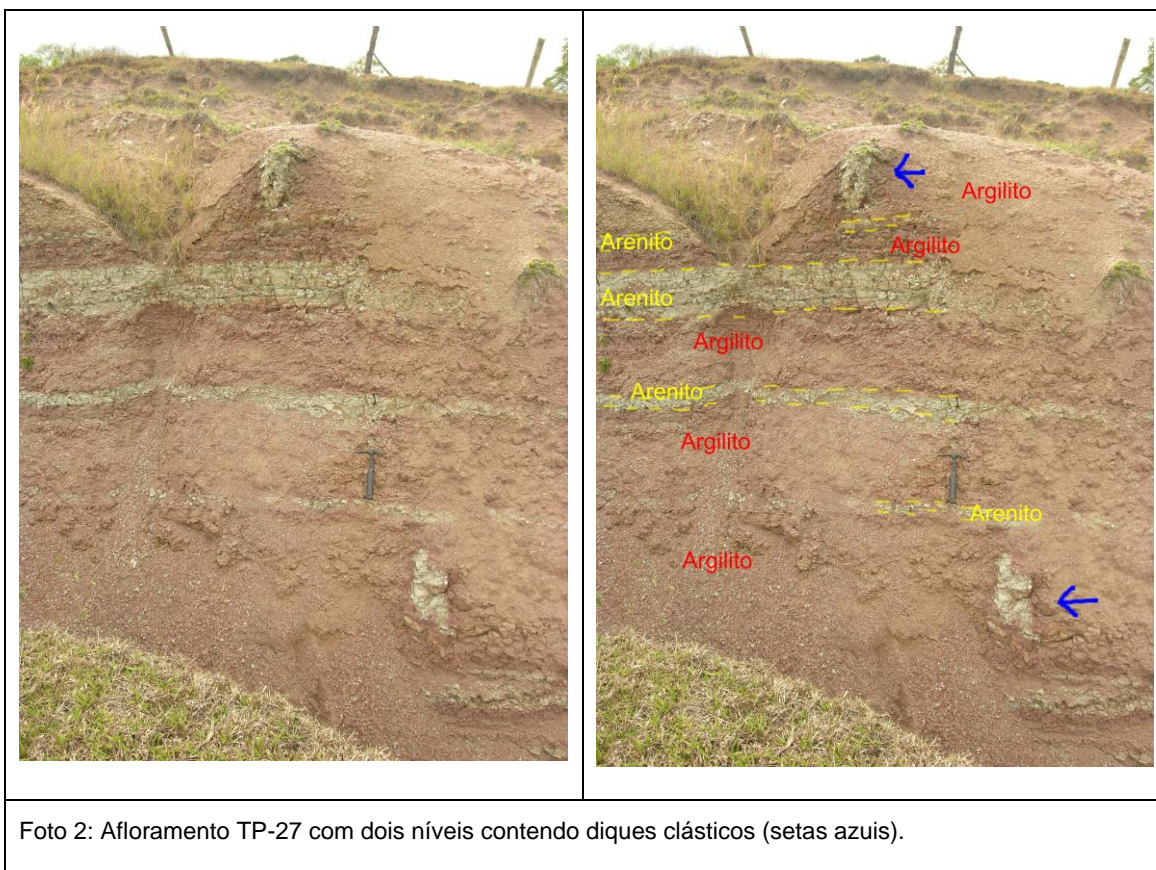


Foto 2: Afloramento TP-27 com dois níveis contendo diques clásticos (setas azuis).



Foto 3: Dique ramificado (setas azuis) observado no afloramento TP-11, evidenciando injeção forçada para cima.

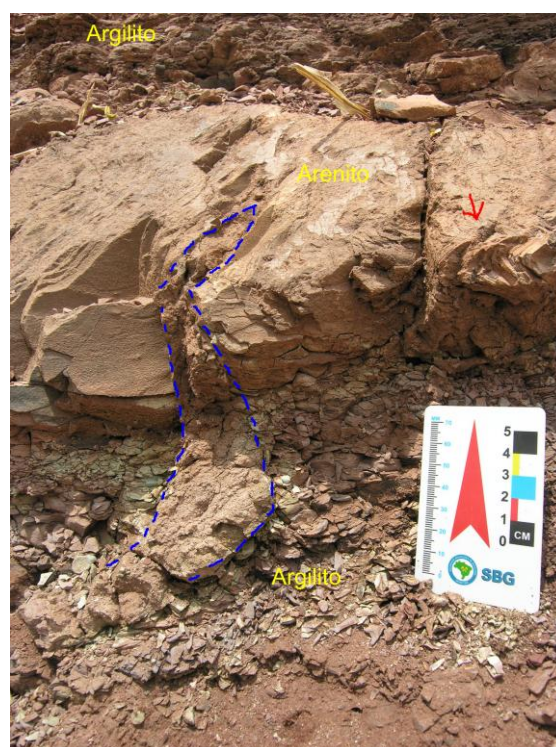


Foto 4: Dique clástico (tracejado azul) intrudindo a lente de arenito com estruturas de liquefação (seta vermelha).



Foto 5: Dique clástico enterolítico.

Outras duas formas de intrusões clásticas são observadas no afloramento TP-11, um sill de aproximadamente 15 cm de comprimento e 2 cm de largura e uma “bola de areia”; estas estruturas estão associadas a um dique com 2 cm de espessura (Foto 6).

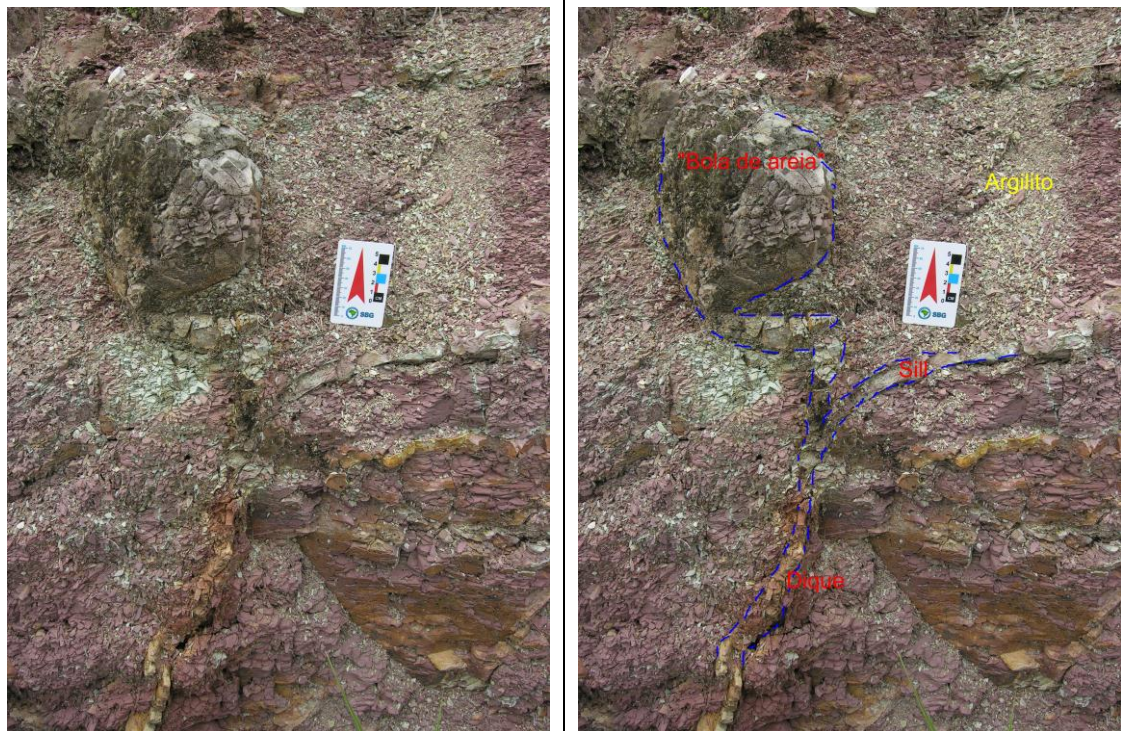


Foto 6: Dique clástico associado a um sill e a uma “bola de areia”, ressaltados pelo tracejado azul.

Nos afloramentos estudados ocorrem também fraturas preenchidas por calcita fibrosa, algumas delas mostrando uma clara associação com os diques clásticos, enquanto outras aparentam ser posteriores (Foto 7). Algumas fraturas com calcita tem dobramento enterolítico, evidenciando que o preenchimento ocorreu antes da compactação do sedimento encaixante (Foto 8).



Foto 7: Diques clásticos (tracejado azul) interrompidos no topo por fraturas preenchidas por calcita (tracejado e seta amarela); estas estruturas cortam outra fratura (tracejado vermelho).

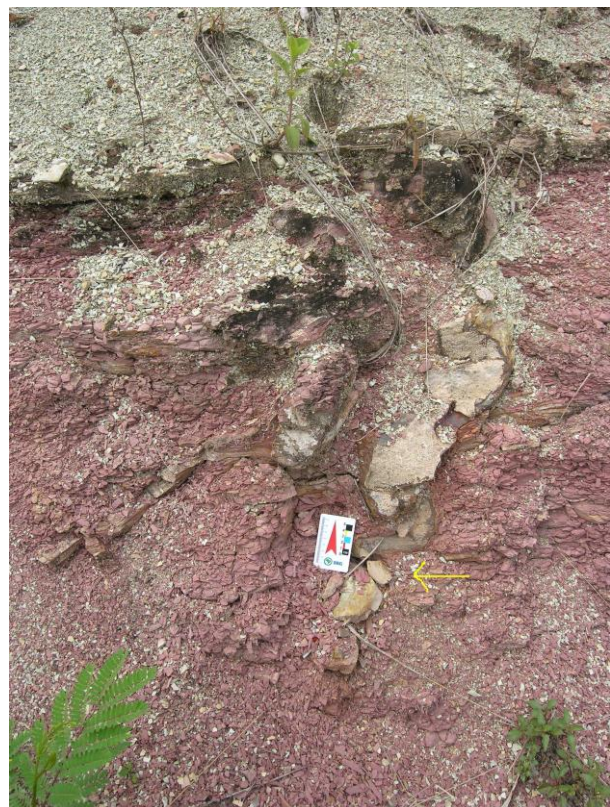
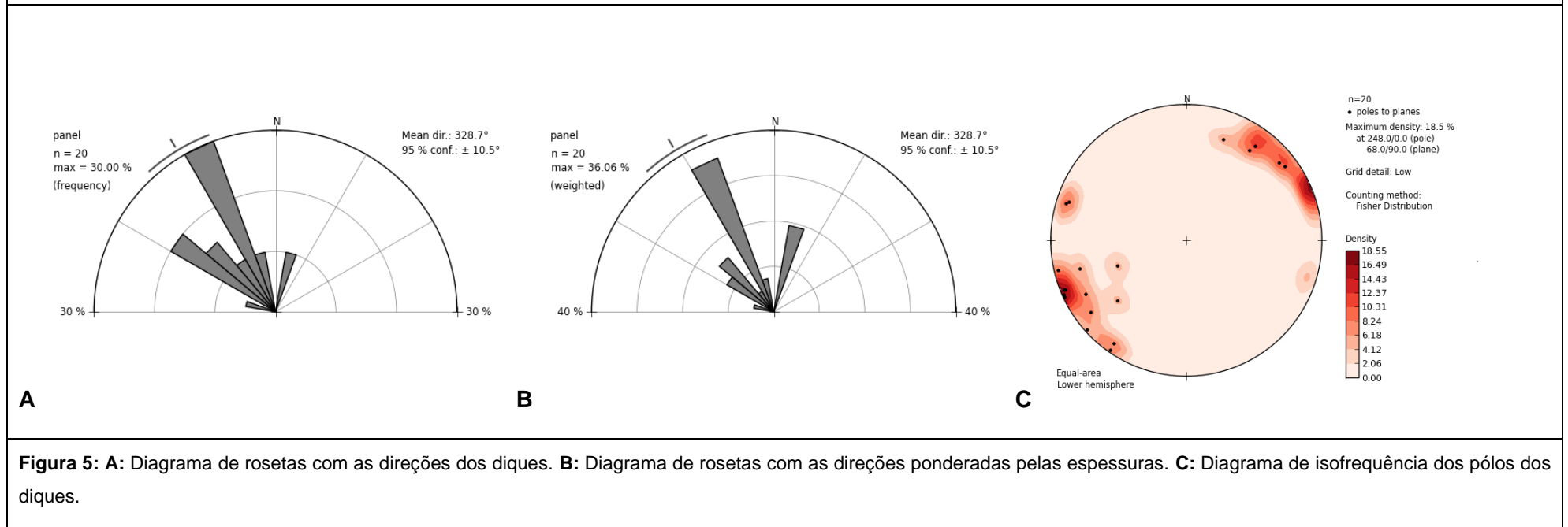


Foto 8: Fratura preenchida por calcita fibrosa dobrada de forma enterolítica (seta amarela).

9.1.1 Dados estruturais

A partir das medidas obtidas foram confeccionados para os afloramentos TP-11, TP-13 e TP-27 diagramas em roseta mostrando a frequência das orientações e a frequência ponderada pelas espessuras dos diques; também foram elaborados diagramas de isofrequência para cada afloramento.(Figuras 5 a 7). Além disso foram confeccionados diagramas para o total das medidas dos afloramentos supracitados (Figura 8).

Afloramento TP-11 (22K 07877676/7426491)



Afloramento TP-13 (22K 0788629/7427069)

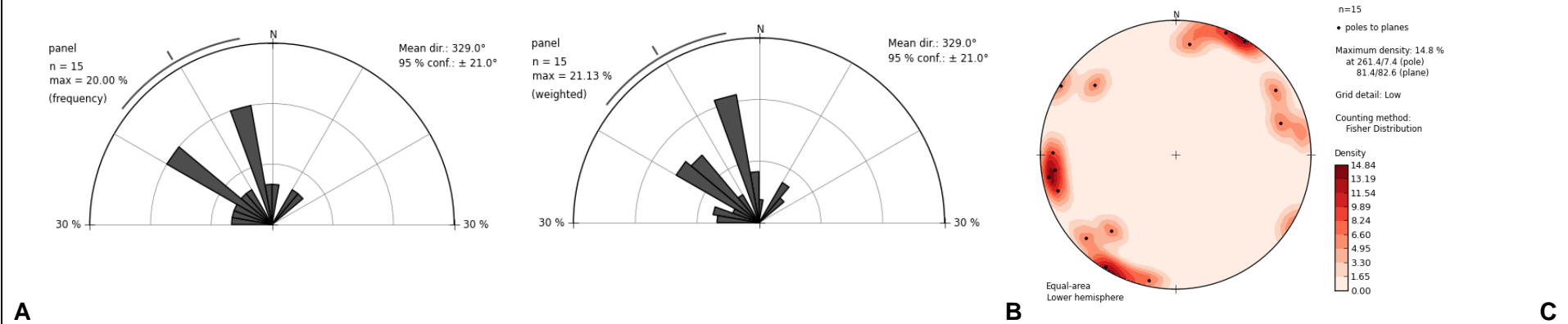


Figura 6: A: Diagrama de rosetas com as direções dos diques. **B:** Diagrama de rosetas com as direções ponderadas pelas espessuras. **C:** Diagrama de isofrequência dos pólos dos diques.

Afloramento TP-27 (22K 0789550/7429044)

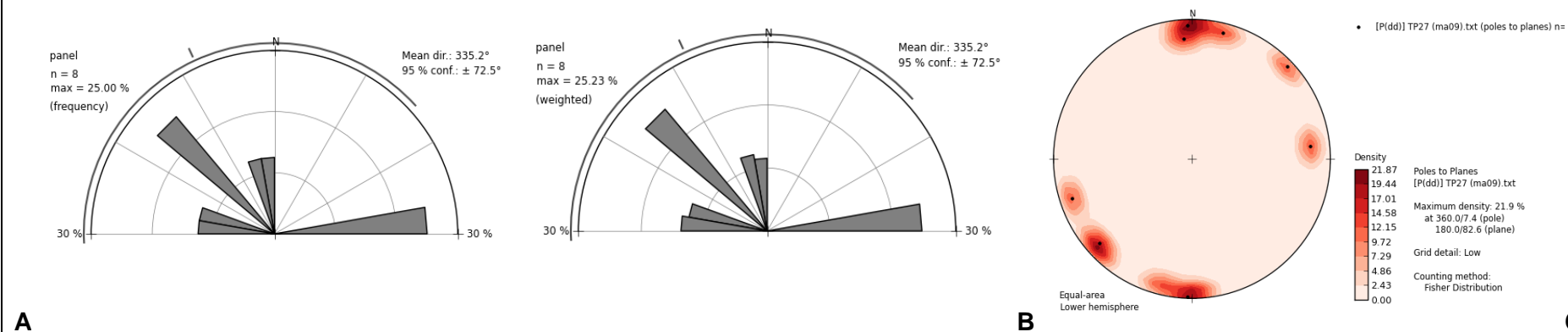


Figura 7: A: Diagrama de rosetas com as direções dos diques. **B:** Diagrama de rosetas com as direções ponderadas pelas espessuras. **C:** Diagrama de isofrequência dos pólos dos diques.

Diagrama total dos dados dos afloramentos TP-11, TP-13, TP-25, TP-26 e TP-27

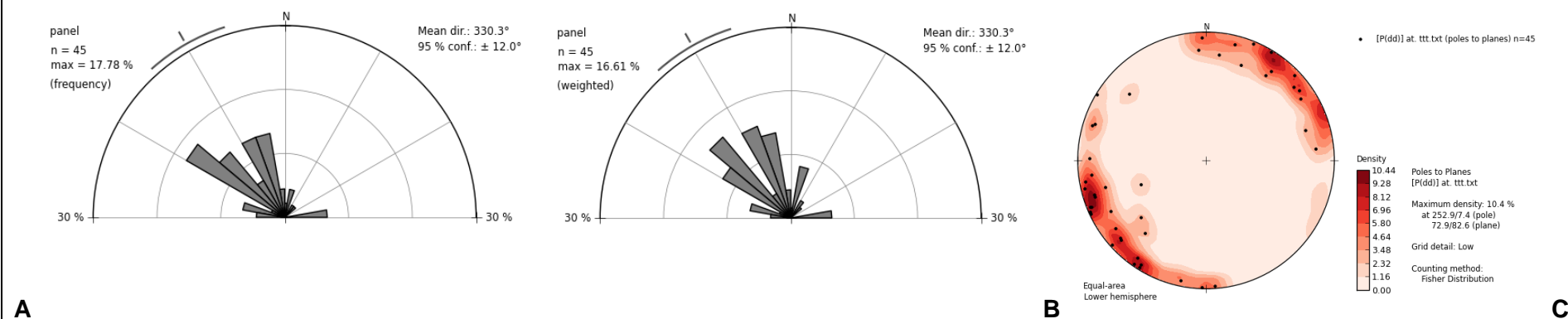


Figura 8: **A:** Diagrama de rosetas com as direções dos diques. **B:** Diagrama de rosetas com as direções ponderadas pelas espessuras. **C:** Diagrama de isofrequência dos pólos dos diques.

No afloramento TP-11, o diagrama em roseta mostra direção preferencial para N30W, o que indica direção de esforço principal mínimo (σ_3) segundo N60E. A direção predominante condiz com os diques mais espessos.

O diagrama em roseta do afloramento TP-13 mostra duas direções predominantes, uma em torno de N15W e outra em torno de N60W, com direção média em torno de N35W, o que mostra que a direção de esforço principal mínimo em torno de N55E. As direções predominantes são condizentes com as direções dos diques mais espessos.

Os dados do afloramento TP-27 estão dispersos mas se apresentam razoavelmente concordantes com os obtidos nos outros afloramentos da Formação Teresina, embora aqui também existam diques com direção principal em torno de E-W. Em função do pequeno numero de medidas, é difícil chegar a uma conclusão clara sobre a direção do esforço principal mínimo.

O diagrama em roseta com a inclusão dos afloramentos TP-11, TP-13, TP-25, TP-26 e TP-27 mostra duas direções predominantes, em torno de N30W e de N50W, com direção média em torno de N40W. Essa disposição indica direção de esforço mínimo N50E, condizente com a dos diques mais espessos.

9.2 Outras estruturas presentes

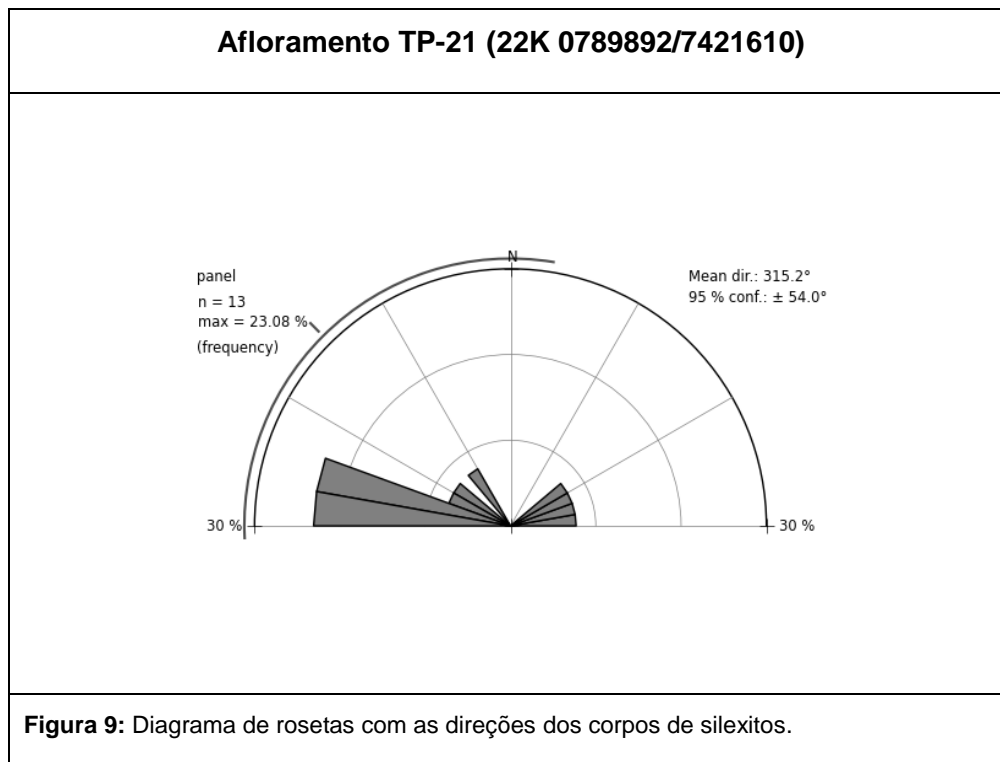
Nos afloramentos TP-21 e TP-24 são observadas corpos de silexitos em forma de cunha, silicificados (Foto 9) e semelhantes a diques clásticos (Foto 10), preenchidas por pisólitos. Estão alojadas em um mesmo nível, comumente em uma das camadas de argilito, entre camadas de silexito.





Foto 10: Corpo tabular de silexito com extremidade acunhada que afina para a base. Notar a semelhança com diques clásticos observados nos demais afloramentos estudados.

A direção preferencial destas estruturas é aproximadamente E-W, o que não condiz com as orientações preferenciais dos diques clásticos (Figura 9). A origem destas estruturas ainda é desconhecida e sua descrição foge aos objetivos do presente Trabalho de Formatura. São aqui mencionadas apenas por serem passíveis de confusão com diques clásticos.



10 Formação Serra Alta

Foi descrito também um afloramento pertencente à Formação Serra Alta, composta por folhelhos cinza-escuros, com níveis de concreções carbonáticas com fósseis.

Neste afloramento ocorrem diques clásticos tabulares, preenchidos por areia muito fina, que afinam em direção à base, com espessuras que variam entre 1 a 7 cm. (Foto 11) Ocorrem xenólitos de folhelho nos diques e alguns deles apresentam cimentação carbonática. Os diques cortam fraturas preenchidas com calcita (Foto 12).

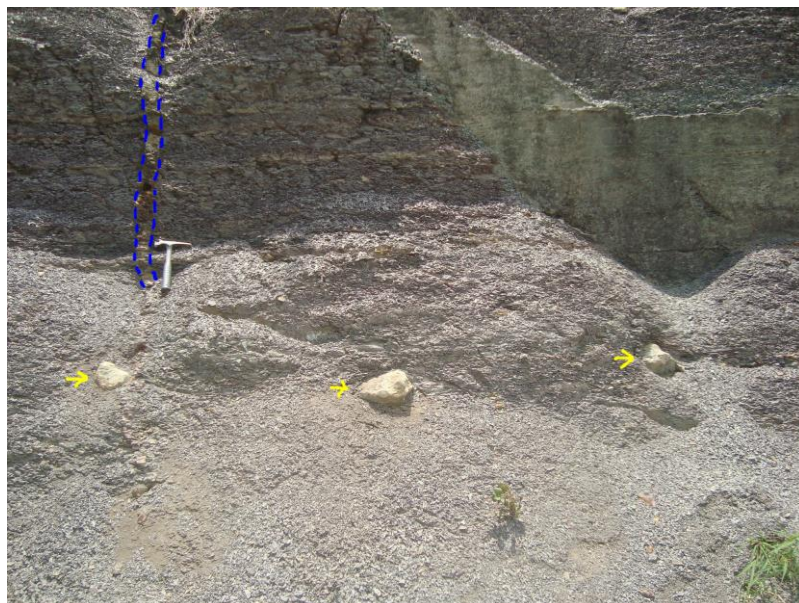


Foto 11: Dique clástico tabular (tracejado azul) alojado em siltitos com concreções carbonáticas esferoidais.

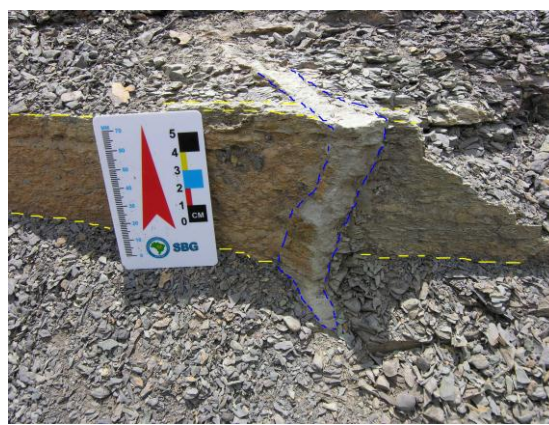


Foto 12: Dique clástico (tracejado azul) cortando fratura preenchida por calcita (tracejado amarelo)

Os diques medidos nesta formação apresentam direção predominante NW-SE, condizente com os resultados dos diques clásticos da Formação Teresina. Devido ao pequeno número de dados não é possível averiguar se há uma direção preferencial de maior espessura (Figura 10)

Afloramento TP28 (22K 0795025/7427095)

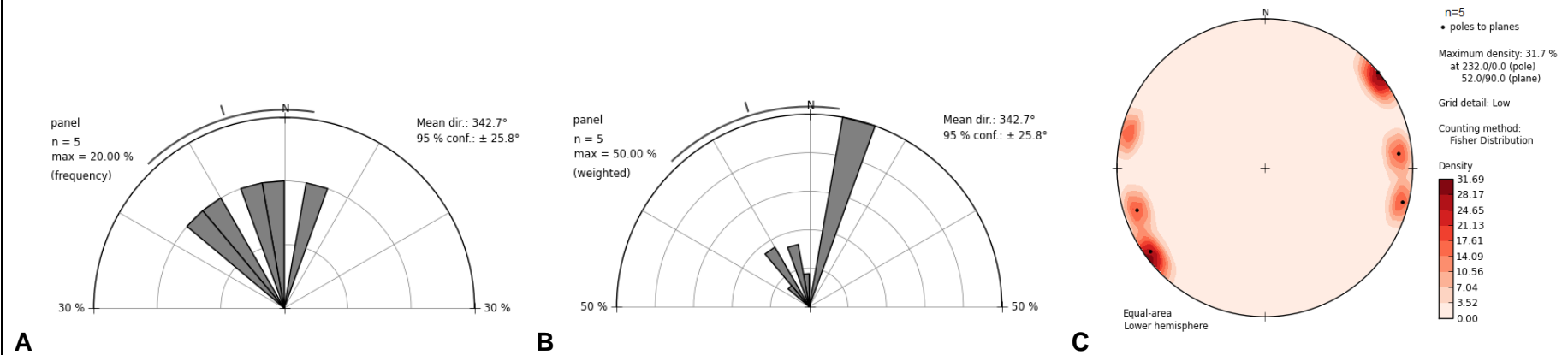


Figura 10: **A:** Diagrama de rosetas com as direções dos diques. **B:** Diagrama de rosetas com as direções ponderadas pelas espessuras. **C:** Diagrama de densidade com dos pólos dos diques

11 Discussão

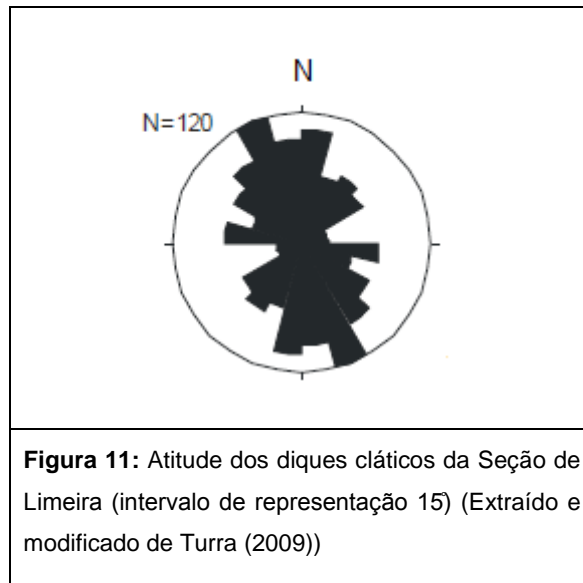
Os diques clásticos estão predominantemente dispostos nos argilitos de pelo menos dois níveis distintos da Formação Teresina, são subverticais e mostram uma orientação preferencial oscilando entre N20W e N50W, com direção média em torno de N30W.

As estruturas observadas nos afloramentos TP-11 e TP-25, como ramificação e sill, e intrusão parcial em uma lente de arenito respectivamente, indicam uma injeção forçada de baixo para cima. O sentido ascendente pode ser averiguado no afloramento TP-13, onde diques tem como fonte arenitos dispostos em suas extremidades inferiores. Estes indicadores de injeção forçada a partir de baixo mostram que a origem destas estruturas está associada com a fluidificação de areias inconsolidadas induzidas por abalos sísmicos.

Dobras de arrasto nas encaixantes e diques enterolíticos evidenciam efeitos de compactação, posteriores ao alojamento dos diques. Fraturas preenchidas com calcita fibrosa muitas vezes estão associadas aos diques clásticos, sugerindo efeitos hidrotermais possivelmente induzidos pelo bombeamento sísmico.

Os diques clásticos observados na Formação Serra Alta, apesar do pequeno número de medidas, mostram também direção semelhante às dos diques da Formação Teresina, sugerindo que sua colocação ocorreu sob o mesmo regime de esforços e está provavelmente relacionada a estes últimos.

As orientações médias obtidas para os diques clásticos da Formação Teresina, na região de Torre de Pedra, são compatíveis com aquelas obtidas por Turra (2009) para os diques clásticos da Formação Corumbataí na região de Limeira-Charqueada, em especial para os afloramentos de Limeira (onde a pétala principal possui orientação aproximada N35W) e de Batovi (onde a orientação principal de um dos níveis é em torno de N20-30W) (Figura 11). Dessa forma, os resultados obtidos no presente Trabalho de Formatura suportam a hipótese de que os diques clásticos têm sua direção principal condicionada por um campo de esforços regional, possivelmente ligado à propagação remota de esforços gerados na borda sul do Gondwana durante o Permotriássico.



12 Conclusões

Os diques clásticos da Formação Teresina na Região do Município de Torre de Pedra são corpos tabulares, alojados nos argilitos por injeção forçada ascendente, quando ainda os sedimentos estavam inconsolidados. Posteriormente sofreram compactação, evidenciada pela presença de dobras de arrasto nos argilitos encaixantes, como também em diques com dobras enterolíticas.

O campo de esforços regionais mostra direção de compressão em torno de N30W, o que condiz com o esforço principal mínimo em torno de N60E. Esta direção é concordante com as orientações obtidas no afloramento TP-28 da Formação Serra Alta e pode indicar uma forte influência da propagação de ondas sísmicas na injeção e orientação dos diques clásticos.

13 Referências

- Allen, J. R. L. (1984). Sedimentary structures: their character and physical basis. *Developments in Sedimentology*. Elsevier, Amsterdam, New York, 30v, 663p.
- Bezerra, H. R. F.; Fonseca, V. P.; Vita-Finzi, C.; Lima-Filho, F. P.; Saadi, A. 2005. Liquefaction-induced structures in Quaternary alluvial gravels and gravelly sediments, NE Brazil. *Engineering Geology*, 76: 191-208
- Boehm, A. & Moore, J. C. (2002). Fluidized sandstone intrusions as an indicator of Paleostress orientation, Santa Cruz, Califórnia. *Geofluids*, 2: 147-161.
- Milani, E. J., Melo, J. H. G., Souza, P.A., Fernandes, L. A., França, A. B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociência da Petrobrás*, v15, 2: 265-288.
- Chamani, M. A. C. (2011). *Tectônica intraplaca e deformação sinsedimentar induzidas por abalos sísmicos: o lineamento transbrasileiro e estruturas relacionadas na província Parnaíba, Brasil*. Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, 100p.
- Chi, G.; Xue, C.; Qing, C.; Xue, W.; Zhang, J.; Sun, Y. (2012). Hydrodynamic analysis of clastic injection and hydraulic fracturing structures in the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China. *Geoscience Frontiers*, 3(1): 73-84.
- Cosgrove, J. W. (1995). *The expression of fracturing in rocks and sediments*. In: Ameen, M. S. (ed.) *Fractography: Fracture Topography as a Tool in Fracture mechanics and Stress Analysis*. Geological Society, London, Special Publications, 92: 187-196
- Diller, J. S. (1890). Sandstone Dikes. *Bulletin of the Geological Society America*, 1: 411-442.
- Fernandes L. A. & Coimbra A. M. (1993). Registros de episódios sísmicos na parte superior da Formação Rio do Rastro no Paraná. Brasil. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 3, Rio de Janeiro. *Atas*. Rio de Janeiro, SBG/ UERJ, p. 271-275.
- Grohmann, C.H. and Campanha, G.A.C., 2010. OpenStereo: open source, cross-platform software for structural geology analysis. Presented at the AGU 2010 Fall Meeting, San Francisco, CA.
- Hayashi, T. (1966). Clastic Dykes in Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*, 37: 1-20.

- Hardie, J. K. (1999). Clastic dikes intruding cretaceous coals of western Colorado. *Bulletin of the Colorado Geological Survey*, 53.
- Harms, J. C. (1965). Sandstone dikes in relation to Laramide Faults and stress distribution in the Southern front range, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, 76: 981-1002.
- Hurst, A.; Scott, A.; Vigorito, M. (2011). Physical characteristics of sand injectites. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, 106: 215-246.
- Duranti, D. & Hurst, A. (2004). Fluidisation and injection in the deep-water sandstones of the Eocene Alba Formation (UK North Sea). *Sedimentology*, 51: 503-531.
- Johnston, S. T. (2002). The Cape Fold Belt and Syntaxis and the rotated Falkland Island: dextral transpressional tectonics along the southwest margin of Gondwana. *Journal of African Earth Sciences*, 31: 51-63.
- Jolly, J. H.; Lonergan, L. (2002). Mechanisms and controls on the formation of sand intrusions. *Journal of the Geological Society*, London, 159: 605-607. doi: 10.1144/0016-764902-025.
- Kane, I. A. (2010). Development and flow structures of sand injectites: The Hind Sandstones Member injectite complex, Carboniferous, UK. *Marine and Petroleum Geology*, Elsevier, 27: 1200-1215.
- Kenkmann, T. (2003). Dike formation, cataclastic flow, and rock fluidization during impact cratering: an example from the Upheaval Dome structure, Utah. *Earth and planetary Science Letters*, Elsevier, 214: 43-58.
- Le Heron, D. P. & Etienne, J. L. (2005). A complex subglacial clastic dykes swarm, Sólheimajökull, southern Iceland. *Sedimentary Geology*, 181: 25-37.
- Levi, T.; Weinberger, R.; Aïfa, T.; Eyal, Y.; Marco, S. (2006). Earthquake-induced clastic dikes detected by anisotropy of magnetic susceptibility. *Geology*, 34: 60-72.
- Levi, T.; Weinberger, R.; Eyal, Y. (2011). A coupled fluid-fracture approach to propagation of clastic dikes during earthquakes. *Tectonophysics*, 498: 35-44.

- Montenat, C.; Barrier, P.; Ott d'Estevou, P. (1991). Some aspects of the recent tectonics in the Strait of Messina, Italy. *Tectonophysics* 194, 203-215.
- Montenat, C.; Barrier, P.; Ott D'Estevou, P.; Hibsh, C. (2007). Seismites: An attempt at critical analysis and classification. *Sedimentary Geology*, 196: 5-30 doi 10.1016/j.sedgeo. 2006.08.004.
- Obermeier, S. F. (1996). Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis – An overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features an how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strenght of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44: 1-76.
- Oomkens, E. (1966). Environmental significance of sand dikes. *Sedimentology*, 7: 145-148.
- Perinotto, J. A. J.; Etchebehere, M. L. C.; Simões, L. S. A.; Zanardo, A. (2008). Diques clásticos na Formação Corumbataí no nordeste da Bacia do Paraná, SP: análise sistemática e significações estratigráficas, sedimentológicas e tectônicas. *Geociências*, 27(4): 469-491.
- Ramos, V. (1984). Patagonia: un continente paleozóico a la deriva? Congresso Geológico Argentino. In: Acta 2: 211-328.
- Riccomini, C.; Chamani, M.A.C.; Avena, S.S.; Fambrini, G.L.; Fairchild, T.R.; Coimbra, A.M. (1992). Earthquake-induced liquefaction features in Corumbataí Formation (Permian, Paraná Basin, Brazil) and the dynamics of Gondwana. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 64: 210.
- Riccomini, C. (1995). *Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondvânico da porção centro-oriental do estado de São Paulo e áreas vizinhas*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Livre docência.
- Riccomini, C; Velázquez, V. F.; Gomes, C. B. (2005b). *Tectonic controls of the mesozoic and cenozoic alkaline magmatism in central-southeasten brazilian plataform*. In: Comin-Chiaramonti, P. & Gomes, C. B. (eds.) Mesozoic to cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Plataform. São Paulo, Edusp-Fapesp, 2005: 31-56.

- Seilacher, A. (1969). Fault-graded beds interpreted as seismites. *Sedimentology*, 13: 155-159.
- Silva, F. R. (2007). *Tectonismo gerador do Alto Estrutural de Torre de Pedra, Bacia do Paraná, SP*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Monografia do Trabalho de Formatura.
- Trouw, R. A. J. & De Wit, M. J. (1999). Relation between the Gondwanide Orogen and contemporaneous intracratonic deformation. *Jurnal of African Earth Sciences*, Pergamon, V.28, n°1, pp 203-213.
- Truswell, J. F. (1972). Sandstone sheets and related intrusions from Coffee bay, Transkei, South Africa. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42: 578-583.
- Turra, B. B. (2009). *Diques clásticos da Formação Corumbataí, Bacia do Paraná, no contexto da tectônica permotriássica do Gondwana Ocidental*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- Van Loon, A. J. (2009). Soft-sediment deformation structure in siliciclastic sediments: an overview. *Geologos*, 15(1): 3-55.
- Zalán, P. V.; Wolff, S.; Astolfi, M. A. M.; Vieira, I. S.; Conceição, J. C. J.; Appi, V. T., Neto, E. V. S.; Cerqueira, J. R.; Marques, A. (1990). The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M. W.; Kolata, D. R.; Oltz, D. F.; Eidel, J. J. Interior Cratonic Basins. *American Association of Petroleum*, Memoir 51, 819p.
- Zanardo, A.; Perinotto, J. A. J.; Etchebehere, M. L. C.; Del Roveri, C. (2009). Petrografia dos diques clásticos da Formação Corumbataí (permiano da Bacia do Paraná), na região de Rio Claro (SP). In: XI Simpósio de Geologia do Sudeste, São Pedro - SP. Anais. São Paulo, SBG, v. 1. p. 48-48.

Site:

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Formação Teresina. Disponível em <www.cprm.gov.br> . Acesso em: 25 de março de 2012.