

# Diques e soleiras na Bacia do Parnaíba: geometria e padrões de alojamento

*Dikes and sills in the Parnaíba Basin: geometry and emplacement patterns*

Ivo Trosdorf Junior | João Marinho de Moraes Neto | Saulo Ferreira Santos | Carlos Vieira Portela Filho

## resumo

A Bacia do Parnaíba, semelhantemente a todas as bacias paleozoicas brasileiras, apresenta corpos ígneos intrusivos em sua seção sedimentar, na forma de diques e, principalmente, soleiras. A geometria e o mecanismo de intrusão são importantes na identificação de trapas capazes de armazenar gás e/ou óleo. Uma variedade de modelos disponíveis na literatura sugere relação complexa entre o magma e a rocha hospedeira. Vários fatores (densidade e pressão de injeção do magma, geração de vapor, campo de tensões regional e local, reologia da rocha hospedeira, etc.) trabalham juntos controlando o alojamento, a expansão e a geometria final dos corpos ígneos intrusivos na coluna sedimentar. Estes corpos ígneos apresentam assinatura conspícua em perfil elétrico. O perfil de Raios Gama (GR) é o mais utilizado para identificação de soleiras, caracterizadas por um aumento na curva de GR em seu terço superior; esta feição é chamada informalmente na Petrobras de “barriguda”. Muitas soleiras ocorrem paralelas

ao acamamento, geralmente intrudindo espessos pacotes de folhelhos e ao longo do contato das formações Longá-Poti, Pimenteiras-Cabeças e Tianguá-Jaicós. Seções sísmicas mostram que as soleiras ocorrem com geometrias variadas, incluindo plano-paralela à camada, forma de pires, planar transgressiva e em bloco falhado. A soleira mais comum na Bacia do Parnaíba é do tipo plano-paralela, sendo que esta geometria pode ocorrer com dezenas a centenas de quilômetros de extensão e espessuras entre 2-5m a 250-300m. A associação entre intrusões magmáticas e reservatórios de gás tem sido apontada como alvo prioritário na exploração das bacias paleozoicas brasileiras. O modelo de trapeamento baseado em saltos de soleiras de diabásio foi testado com sucesso por algumas companhias de petróleo e está consolidado na Bacia do Parnaíba. Além disto, corpos magmáticos intrusivos também fornecem o calor necessário para a geração de gás e na instauração de rotas efetivas de migração.

**Palavras-chave:** Bacia do Parnaíba | diques e soleiras | mecanismo de intrusão | magmatismo.

## abstract

The Parnaíba Basin, in common with all the Brazilian Paleozoic basins, contains intrusive igneous rock bodies in its sedimentary section in the form of dikes and, principally, sills. The geometry and the mechanism for intrusion are important in the identification of the traps capable of storing gas and/or oil. A variety of models available in literature suggest a complex relationship between the magma and the host rock. Various factors (density and pressure of the magma injection, steam generation, regional and local stress fields and the rheology of the host rock, etc.) work together controlling the emplacement, the expansion and the final geometry of the intrusive igneous bodies in the sedimentary column. These igneous bodies demonstrate a conspicuous signature in an electronic log. The Gamma Ray profile (GR) is the most utilized to identify the sills, characterized by an increase in the GR curve in the upper third; this feature is colloquially known at Petrobras as “barriguda (paunchy)”. Many sills occur parallel to the bedding, generally intruding thick packets of shales and along the contact of the Longá-Poti, Pimenteiras-Cabeças and Tianguá-Jaicós formations. Seismic sections show that the sills occur with varying geometries, including “layer parallel”, “saucer-shaped”, “planar transgressive” and “fault block”. By far the most common sill in the Parnaíba Basin is the layer parallel, with this geometry able to occur with up to hundreds of kilometers of extension and thicknesses of between 2-5m and 250-300m. The association between magmatic intrusions and gas reservoirs has been pointed out as a priority target in the exploration of Brazilian Paleozoic basins. The model of trapping based on diabase sill jumps has been successfully tested by some oil companies and is consolidated in the Parnaíba Basin. In addition, intrusive magmatic bodies also provide the heat necessary for the generation of gas and in the establishment of effective migration paths.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

**Keywords:** Parnaíba Basin | dikes and sills | intrusion mechanism | magmatism.

## introdução

A exploração de hidrocarbonetos nas bacias paleozoicas brasileiras apresenta um aspecto peculiar: a intrusão de diques e soleiras de diabásio em diversos níveis estratigráficos. O conhecimento da geometria desses corpos ígneos e dos mecanismos de intrusão pode auxiliar na identificação de trapas capazes de armazenar hidrocarbonetos, além de contribuir para o entendimento dos campos de tensões regionais associados aos grandes eventos magmáticos a que estas bacias estiveram submetidas.

A Bacia do Parnaíba (fig. 1), em especial, foi palco de duas grandes manifestações magmáticas: uma na passagem Triássico-Jurássico (ca. 200 Ma) e outra no Eocretáceo (ca. 130 Ma), agrupadas nas formações Mosquito e Sardinha, respectivamente. O recente interesse exploratório na bacia e, conseqüentemente, a aquisição de novos dados sísmicos, o reprocessamento de linhas sísmicas antigas, a perfuração de poços exploratórios e a reinterpretação de poços antigos permitiram a identificação e caracterização de diferentes geometrias, com implicações diretas na exploração de hidrocarbonetos.

O presente artigo aponta o comportamento e padrões desses corpos ígneos em perfis elétricos, tais como raios gama, resistividade, densidade e sônico. Adicionalmente, também descreve as geometrias observadas em sísmica 2D, comparando-as com os dados mais recentes da literatura, além de

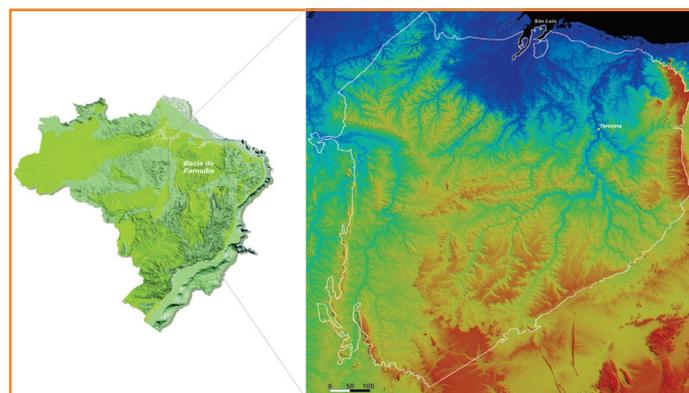


Figura 1 – Mapa de localização da Bacia do Parnaíba sobre modelo digital de terreno SRTM.

Figure 1 – Location map of the Parnaíba Basin on SRTM digital elevation model.

sugerir os principais fatores que controlaram especialmente (área e nicho estratigráfico) a intrusão desses corpos ígneos na Bacia do Parnaíba.

Alguns aspectos relevantes da influência dos corpos ígneos intrusivos no sistema petrolífero também são discutidos.

## modelos teóricos de intrusão de rochas magmáticas

Um dos primeiros modelos a propor, com relativo detalhe, um mecanismo de intrusão de soleiras e lacólitos foi o de Gilbert (1877 *apud* Liss, 2003), que concluiu que, para que ocorra a injeção do magma lateralmente, a pressão deve superar ou estar em equilíbrio com a pressão litosférica. Este modelo foi o primeiro a sugerir que os corpos magmáticos concordantes são alimentados por um dique ou *pipe* e que o nível em que a intrusão fica alojada dentro da coluna sedimentar é determinado pelo balanço da pressão litosférica e a diferença de densidade entre o magma e a rocha encaixante (fig. 2).

Posteriormente, diversos outros modelos que descrevem o mecanismo de alojamento de soleiras (*sill emplacement*) foram propostos. Dentre os principais elementos sugeridos estão: a densidade do magma e a direção da tensão do magma em relação ao campo de tensão regional (Anderson, 1951); o peso da coluna sedimentar (sobrecarga) acima da intrusão (Mudge, 1968); barreiras de fluxo e produção de vapor pela interação do magma com água presente na rocha hospedeira (fig. 3; Mudge, 1968; Bradley, 1965); descontinuidades mecânicas, tais como acamamento e foliação (Mudge, 1968; Gretener, 1969; Pollard, 1973; Pollard e Johnson, 1973); tensão estratificada horizontalmente devido ao contraste das propriedades petrofísicas entre as diferentes unidades litológicas (Gretener, 1969); e a existência e o aproveitamento de juntas (Leaman, 1975) ou falhas (Parry *et al.*, 1997).

Em trabalhos de campo nas Montanhas Henry, Utah (EUA), Pollard e Johnson (1973) e Johnson e Pollard (1973), analisaram o mecanismo de alojamento de soleiras e a transição entre soleiras e lacólitos. Segundo os autores, a partir do momento em que um dique é reorientado para um plano horizontal, a intrusão propaga-se com relativa facilidade

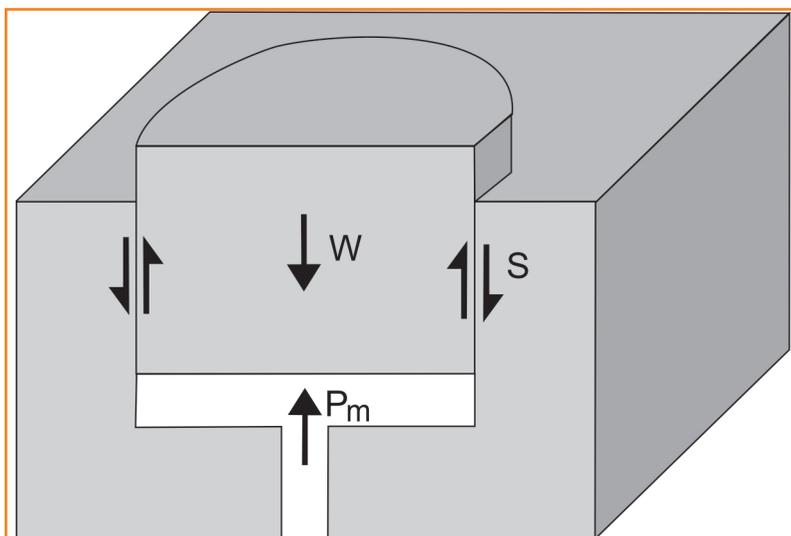
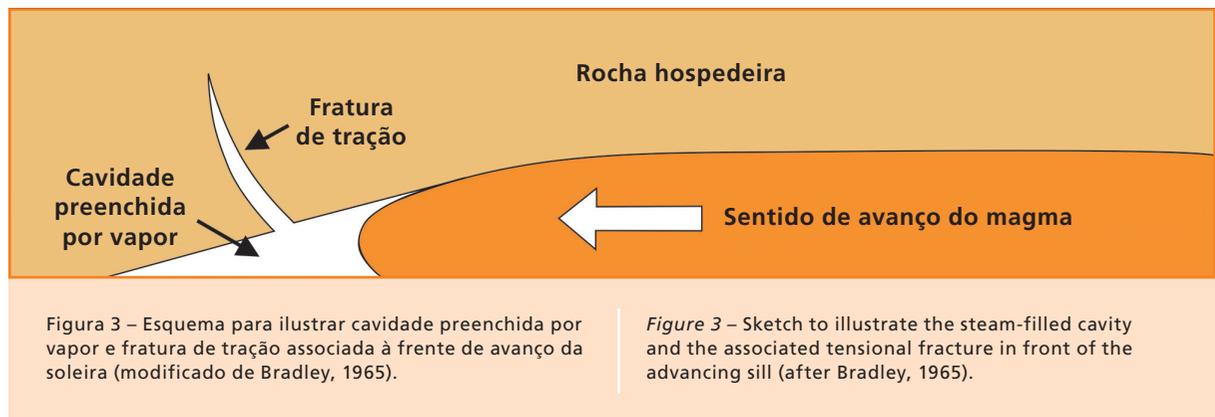


Figura 2 – Modelo mecânico de Gilbert para intrusão de lacólitos (modificado de Johnson e Pollard, 1973).  $P_m$  – pressão magmática;  $W$  – peso da sobrecarga;  $S$  – força de cisalhamento. A pressão do magma ( $P_m$ ), ao agir sobre o cilindro de carga, sofre resistência do peso ( $W$ ) e da tensão cisalhante ( $S$ ). Isto causa a formação de uma fratura vertical cilíndrica na periferia da intrusão, através da qual o material subjacente se desloca para cima.

Figure 2 – Gilbert's mechanical model for laccolithic intrusion (after Johnson and Pollard, 1973).  $P_m$  – magma pressure;  $W$  – overburden weight;  $S$  – shear force. Magma pressure ( $P_m$ ) acting on the cylinder undergoes resistance of overburden weight ( $W$ ) and the shear force ( $S$ ). This causes the formation of a cylindrical vertical fracture around the intrusion periphery, by which the underlying material moves upwards.

dentro da rocha encaixante devido à concentração das tensões na ponta da soleira. Este mecanismo de propagação acarreta a formação de uma zona cataclásada na encaixante em decorrência da intrusão (Rubin, 1995). Este conceito de “partição” ou abertura de uma fenda na rocha encaixante, como consequência da tensão acumulada nas pontas dessas intrusões horizontais, já havia sido descrito por Anderson (1938 *apud* Liss, 2003).

Adicionalmente, Pollard e Johnson (1973) observaram que soleiras e lacólitos geralmente apresentam diques periféricos, os quais foram reproduzidos em modelos físicos análogos (fig. 4). Com a propagação lateral das intrusões, os corpos magmáticos tendem a soerguer e dobrar a coluna sedimentar acima da soleira. A consequência deste processo de intrusão é a formação de fraturas na periferia das soleiras e lacólitos, as quais são aproveitadas pelo magma, resultando nos diques periféricos observados pelos autores (fig. 4). Em algumas situações, esses diques podem intrudir horizontalmente em níveis estratigráficos



superiores, levando à formação de soleiras com geometria em degraus.

Posteriormente, em estudo baseado nas soleiras da região de Whin e Midland Valley (sul da Escócia), Francis (1982) propôs um novo modelo para alojamento de soleiras, o qual poderia ser aplicado para qualquer corpo intrusivo. Com base na análise da geometria das soleiras estudadas, o autor concluiu que qualquer modelo de alojamento deve levar em consideração os seguintes pontos:

1. soleiras tendem a formar corpos com geometria na forma de pires (*saucer-shaped sills*);
2. há uma correspondência entre a forma de pires e os planos de acamamento;
3. a espessura máxima das soleiras geralmente se situa nas porções mais baixas das bacias sedimentares;
4. as bordas dos pires tendem a ser escalonadas e apresentam terminações em forma de lente;
5. ausência de diques alimentadores em áreas onde as soleiras apresentam maior espessura e localização desses diques nos flancos das estruturas ou das bacias;
6. evidências mostram que em algumas áreas o magma flui para cima e em outras para baixo em relação à horizontal, ao tempo do alojamento.

O modelo de alojamento de Francis (1982) sugere que os diques alimentadores intrudem nas ombreiras da bacia. Isto ocorreria a algumas centenas de metros acima do nível de equilíbrio de flutuabilidade (*level of neutral buoyancy*), onde a densidade do magma se iguala à densidade da rocha encaixante vizinha. Nesta condição, os diques ficariam confinados, e, devido à pressão hidrostática na ponta do dique, tem início o processo de

alojamento da soleira em um horizonte onde a densidade do magma ainda excede a dos sedimentos. Neste modelo, o fluxo magmático é controlado pela gravidade, sendo dirigido mergulho abaixo, ao longo dos planos de acamamento da rocha

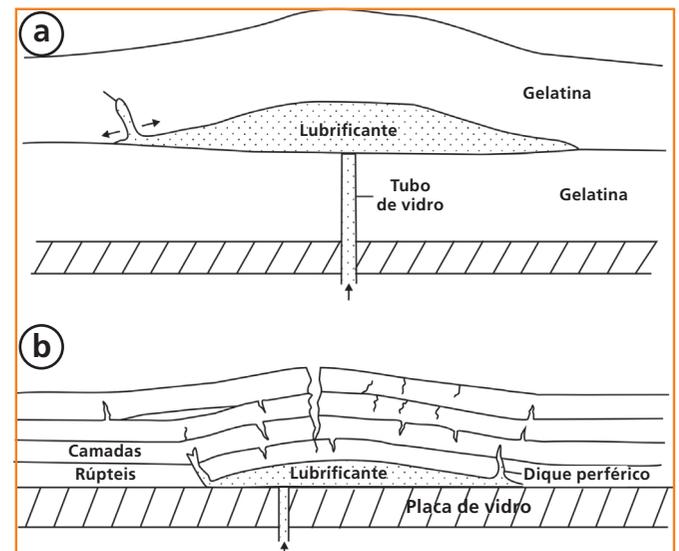


Figura 4 – Formação de diques periféricos em modelos físicos de intrusão de lacólitos. (a) O fluido intrudido espalha-se entre duas camadas de gelatina até o desenvolvimento de uma fratura periférica, permitindo a formação do dique; (b) em um material semirrúptil, as fraturas se desenvolvem no centro e nas bordas. Entretanto, as fraturas centrais estão abertas para cima, impossibilitando que o fluido intrudido forme o dique central. No experimento, observou-se que os diques foram formados apenas na periferia (Pollard e Johnson, 1973).

Figure 4 – Formation of peripheral dikes in experimental models of laccolithic intrusions. (a) The intruding fluid spreads between two gelatin layers until a fracture develops over the periphery, enabling the dike to form; (b) in a semi-brittle material fractures developed both over the center and over the periphery. However, the central fractures opened upward so the intruding fluid could not form a dike there. In the experiment, it was observed that dikes were only formed over the periphery (Pollard and Johnson, 1973).

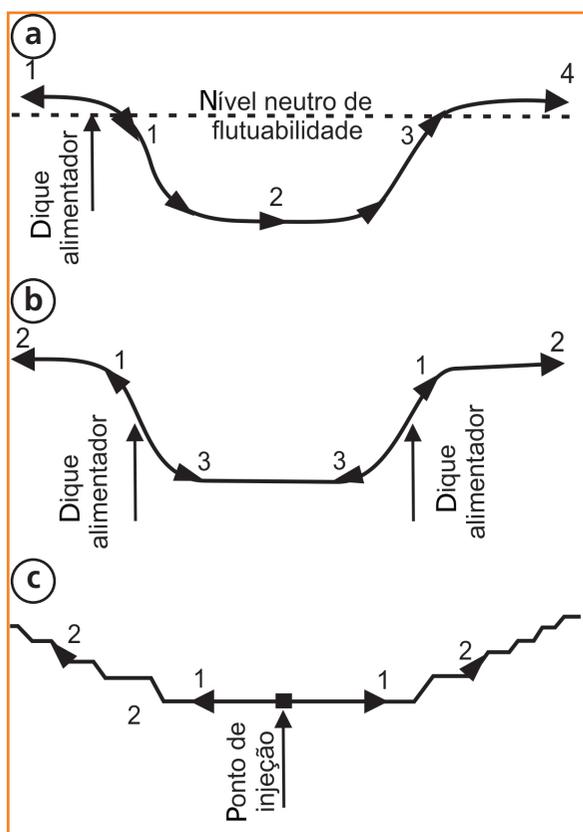


Figura 5 – Modelos de alojamento de soleira. (a) Modelo de Francis (1982); (b) modelo de Chevallier e Woodford (1999); (c) modelo de Malthe-Sørenssen et al. (2004). Os números indicam os estágios individuais de desenvolvimento da soleira. Notar que para cada modelo o magma flui de modo diferente (Neumann et al., 2003).

Figure 5 – Sill emplacement models. (a) Model after Francis (1982); (b) model after Chevallier and Woodford (1999); (c) model after Malthe-Sørenssen et al. (2004). The numbers indicate the individual stages of sill development. Note that for each model the magma flows differently (Neumann et al., 2003).

encaixante, para o centro da bacia, onde a soleira alcança sua maior espessura. Posteriormente, para atingir o equilíbrio hidrostático, o magma passa a fluir mergulho acima, ascendendo para o flanco oposto da bacia, levando à geração da forma característica de pires (fig. 5a).

O modelo proposto por Francis (1982) foi amplamente aceito na comunidade geológica por um considerável período de tempo, até alguns autores começarem a levantar argumentos contrários ao conceito de controle gravitacional do fluxo magmático. Trendall (1994) e Leaman (1995), por exemplo, argumentaram que a pressão do magma, a produção de vapor e o fraturamento da rocha

encaixante são elementos críticos no alojamento e que o papel desempenhado pela gravidade não é significativo, pois todas as forças são dirigidas para cima. Adicionalmente, Leaman (1995) apontou que a terminação das soleiras em forma de lentes nas bordas do pires (ponto 4 de Francis, 1982) não seria observada em soleiras da Tasmânia, onde as intrusões são limitadas por falhas ou têm terminações abruptas. Além disto, no caso das soleiras da Tasmânia, os diques alimentadores estão situados nos pontos mais profundos e espessos da intrusão e não em sua periferia (ponto 5 de Francis, 1982).

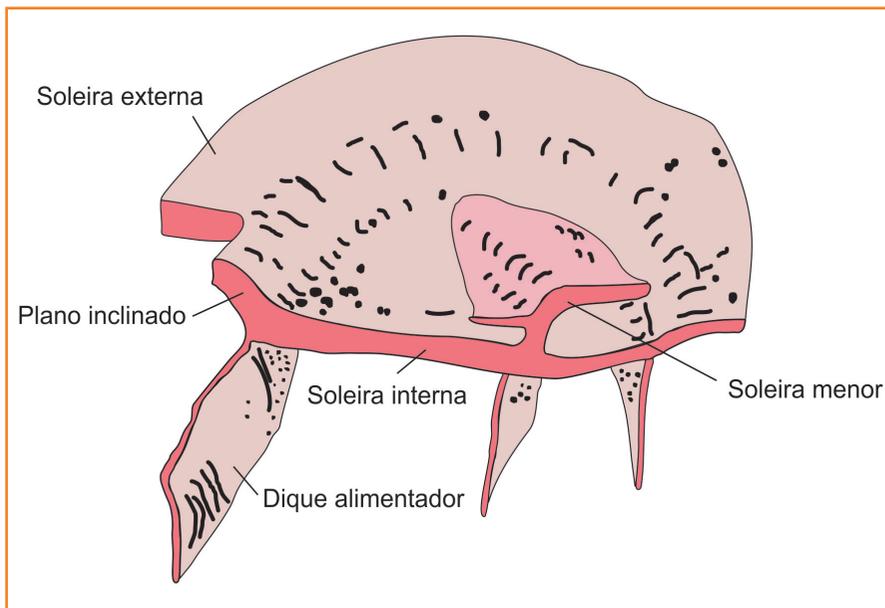
No final do século passado, Chevallier e Woodford (1999) investigaram em detalhe algumas soleiras na Bacia do Karoo, África do Sul. Os autores concluíram que todas as intrusões analisadas são em forma de pires (*saucer-shaped*) e que as intrusões podem ser divididas em soleiras “internas” (*inner*) e “externas” (*outer*), frequentemente ligadas por planos inclinados (*sheet inclined*). Na região do Karoo, as soleiras internas são horizontais e formam a base da geometria de pires. Um plano inclinado, geralmente com mergulho em torno de 60° ou menos, conecta a soleira interna com a externa, que se localiza acima na estratigrafia. A soleira externa forma uma camada de dolerito extensa de até 100km de comprimento e pode estar situada a até 100m acima da soleira interna (fig. 5b).

Chevallier e Woodford (1999) também observaram que os diques geralmente se situam na periferia das soleiras internas, onde alimentam diretamente os planos inclinados. Adicionalmente, soleiras menores podem ocorrer como sistemas secundários dentro do grande complexo de soleiras (fig. 6).

Baseados na geometria das intrusões do Karoo, Chevallier e Woodford (1999) propuseram uma modificação no modelo de alojamento. Eles sugeriram que diques alimentadores verticais se tornam inclinados, gerando intrusões em “forma de trompeta” (*trumpet-shaped*). Isto significa que o dique alimentador é curvo ao longo do *strike* e da direção *dip*. Acima, os planos inclinados tornam-se intrusões horizontais, propagando lateralmente para formar a soleira externa. Isto resulta no soerguimento da coluna sedimentar subjacente, criando uma fissura/fratura na porção central da estrutura, mas em um nível estratigráfico inferior. Esta fratura é aproveitada pelo magma, formando a soleira interna.

Malthe-Sørenssen et al. (2004) propuseram que a formação de soleiras do tipo pires, em uma

bacia inicialmente homogênea (sob campo de tensões isotrópico), pode ser explicada pelo efeito do campo de tensão assimétrico gerado pela própria intrusão da soleira. Neste modelo, inicialmente a soleira se estende linearmente a partir de um ponto vertical devido à sobrepressão do fluido; este ponto pode representar um dique alimentador ou um *pipe*. Para soleiras rasas, o modelo proposto indica que as soleiras serão planas até que elas excedam de duas a três vezes em extensão a coluna sedimentar subjacente. A partir deste momento, o campo de tensão localizado na ponta da soleira passa a apresentar um comportamento assimétrico, e a soleira inicia propagação preferencialmente vertical, formando as raízes dos planos inclinados. A ascensão destes planos é então controlada pelo campo de tensão assimétrico gerado pelo soerguimento do pacote acima, que determina o ângulo preferencial de propagação para longe do ponto de injeção (fig. 5c).



**Figura 6**  
Morfologia de um complexo de soleira em pires na Bacia do Karoo (modificado de Chevallier e Woodford, 1999).

**Figure 6**  
Morphology of a complex of saucer-shaped sills in the Karoo Basin (after Chevallier and Woodford, 1999).

Segundo Burchardt (2009), a transição de uma soleira para um lacólito é definida pelo processo de espessamento ou dilatação vertical (*vertical inflation*) do corpo ígneo. Ela ocorre por um mecanismo de dobramento das camadas superiores tão logo a pressão interna do magma possa balancear o peso dos estratos acima. Para ambos os casos, o espessamento das intrusões é o resultado do sucessivo aporte de magma na forma de novos corpos tabulares, que são favorecidos pela criação de um campo de tensões local ao redor da intrusão inicial.

A partir de trabalho de campo nas Montanhas Theron, porção norte das Montanhas

Transantárticas (Antártica), em exposições de um complexo de soleiras datadas do Jurássico (172,1-181,5 ± 2,5 Ma), Hutton (2009) propôs um novo mecanismo de alojamento de soleiras (fig. 7). O modelo proposto baseia-se na observação e interpretação de feições denominadas “pontes”.

O termo ponte, no contexto da geologia de rochas ígneas, foi primeiramente cunhado por Delaney e Pollard (1981 *apud* Hutton, 2009) e tem sido amplamente reconhecido em diques e, mais raramente, em soleiras. Estudando arranjos de segmentos de diques *en echelon*, Delaney e Pollard (1981 *apud* Hutton, 2009) definiram *pontes* como “fatias curvadas de rocha separando segmentos de diques vizinhos *en echelon*”. A depender da evolução das intrusões, se o espessamento do corpo ígneo continua, as *pontes* podem se partir em uma das terminações, originando feições chamadas de “pontes partidas”. No caso de a *ponte* se desprender de ambos os lados, dentro de intrusões mais espessas, elas se tornam xenólitos, sendo então chamadas de pontes xenólitas.

Hutton (2009) propôs que finas soleiras precursoras (protossoleiras) propagariam a frente da soleira principal, tentando encontrar caminhos mais adequados para o corpo principal de magma aproveitar (fig. 7). As protossoleiras podem ocorrer em diversos locais e em níveis estratigráficos distintos, procurando zonas de fraqueza mais adequadas à intrusão. Elas se propagam e expandem de acordo com o sentido do fluxo magmático regional, mas também lateralmente; dependendo da proximidade com outros corpos, pode haver a sobreposição lateral de protossoleiras em níveis estratigráficos diferentes, gerando as chamadas pontes. Uma vez que a sobreposição lateral é estabelecida, o fluxo contínuo de magma para dentro das protossoleiras, a partir do corpo principal, conduz ao espessamento da protossoleira, ao dobramento da ponte e, eventualmente, à sua partição. Este processo, ocorrendo em vários lugares na frente da soleira principal, pode eventualmente acarretar a conexão do sistema inteiro de protossoleiras (embora algumas possam ser abandonadas preservando as pontes), levando o fluxo magmático do corpo principal a preencher inteiramente a rede criada. Neste modelo (fig. 7), o corpo principal move-se progressivamente, ocupando as posições originais das protossoleiras.

A grande variedade de modelos e dados atualmente disponíveis na literatura aponta uma

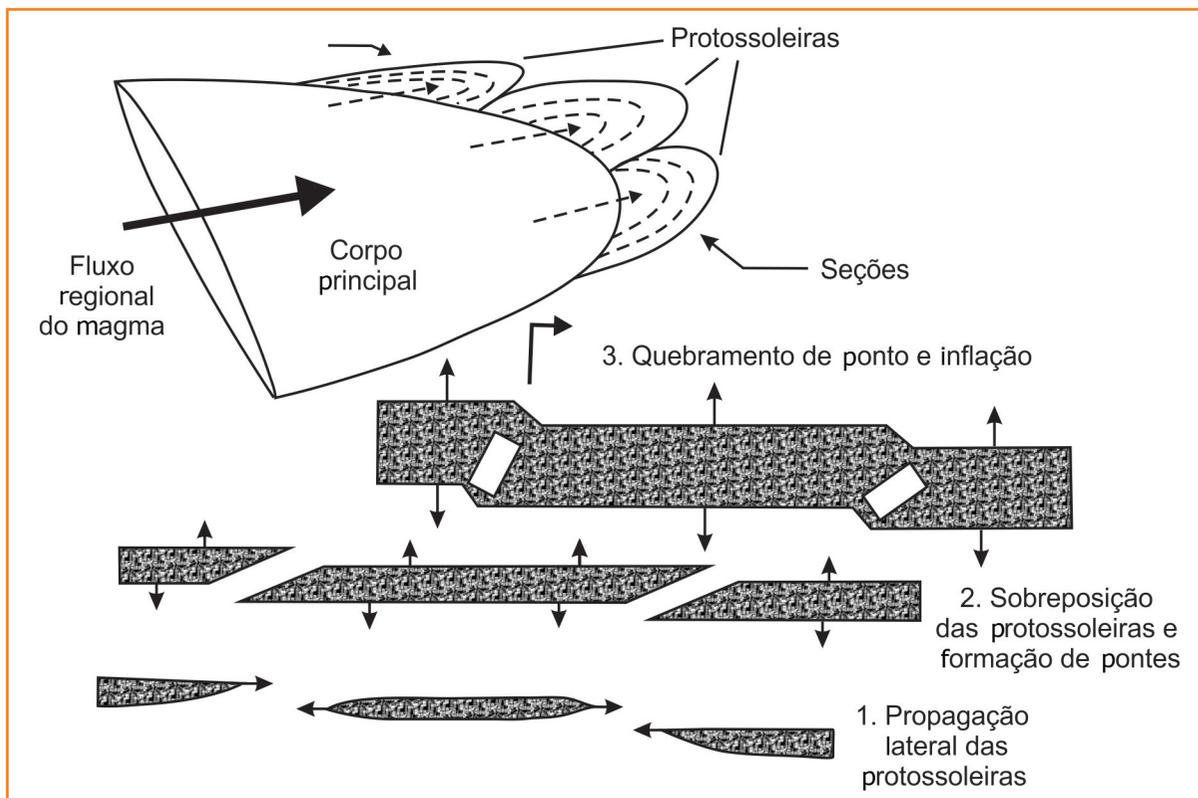


Figura 7 – Neste modelo (Hutton, 2009), as seções (1, 2, e 3) são vistas do topo superior direito do esquema tridimensional, observando-se diretamente na direção do fluxo regional do magma. Protossóleiras menos espessas propagam-se à frente do corpo principal em diferentes níveis estratigráficos e, conforme se movem a jusante, elas também se expandem lateralmente (linhas tracejadas) até a sobreposição se estabelecer (estágio mostrado pelas linhas sólidas).

Figure 7 – According to this model (Hutton, 2009), the sections (1, 2, 3) are viewed from the top right of the three-dimensional sketch looking directly towards the advancing regional magma flow. Thin proto-sills propagate out ahead of the main body at different levels. As they move downstream they also expand laterally (shown by the dashed lines) until overlaps are established (stage shown by solid lines).

inter-relação complexa entre o magma e a rocha encaixante. Diversos parâmetros (densidade e pressão de injeção do magma, produção de vapor, campo de tensões regional e local, pressão litostática, reologia das rochas encaixantes, descontinuidades mecânicas, etc.) atuam em conjunto, controlando o alojamento, a expansão e a geometria final destes corpos ígneos na coluna sedimentar.

Provavelmente, a geometria final da soleira e sua relação com seus alimentadores (diques e/ou *pipes*) são uma inter-relação complexa entre os vários parâmetros descritos acima. O principal desafio para se descrever tais estruturas é identificar os fatores/mecanismos que controlam a intrusão e a expansão destes corpos ígneos na coluna sedimentar.

## identificação e caracterização de diques e soleiras

A identificação e caracterização de diques e soleiras abrangem uma variada gama de ferramentas, podendo envolver diferentes disciplinas das ciências geológicas, incluindo:

- trabalhos de campo: observação das relações de contato do corpo ígneo com as rochas encaixantes (p. ex.: Francis, 1982; Conceição et al., 1993; Liss, 2003; Corazzato e Groppelli, 2004; Galerne et al., 2008; Burchardt, 2009; Hutton, 2009; Porras et al., 2011; Schofield et al., 2012);

- geocronologia, paleomagnetismo, petrologia e geoquímica de rochas ígneas: descrição macro e microscópica, datação geocronológica (K-Ar, Ar/Ar), paleomagnetismo e geoquímica de corpos intrusivos (p. ex.: Liss, 2003; Liss *et al.*, 2004; Awdankiewicz *et al.*, 2004; Galerne *et al.*, 2008; Galerne *et al.*, 2010; Neumann *et al.*, 2011; Svensen *et al.*, 2012);
- modelagem física, numérica e de sistema petrolífero: modelagem dos mecanismos de alojamento dos corpos ígneos e seu efeito no sistema petrolífero, principalmente nos elementos geração, migração, trapa (geometria e retenção) e reservatório (p. ex.: Pollard e Johnson, 1973; Pollard, 1973; Malthe-Sørenssen *et al.*, 2004; Kavanagh *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2007; Ablay *et al.*, 2008; Burchardt, 2008; Bungler *et al.*, 2008; Mathieu *et al.*, 2008; Monreal *et al.*, 2009; Gressier *et al.*, 2010; Gudmundsson e Løtveit, 2014);
- acompanhamento geológico de poços (calha, testemunhos e perfis): descrição de amostras de calha, interpretação das respostas em perfis elétricos (raios gama, resistividade, densidade, sônico) dos diferentes corpos ígneos atravessados pelo poço (p. ex.: Smallwood e Maresh, 2002; Bell e Butcher, 2002; Delpino e Bermúdez, 2009; Porras *et al.*, 2011; Rateau *et al.*, 2013);
- geofísica – sísmica 2D/3D e aeromagnetometria: mapeamento de soleiras e diques, inversão acústica (p. ex.: Skogseid *et al.*, 1992; Smallwood e Maresh, 2002; Bell e Butcher, 2002; Malthe-Sørenssen *et al.*, 2004; Hansen *et al.*, 2004; Thomson e Hutton, 2004; Planke *et al.*, 2005; Cartwright e Hansen, 2006; Thomson e Schofield, 2008; Smallwood, 2009; Porto, 2013).

Neste trabalho, discutiremos a resposta, com base em dados de 34 poços da Bacia do Parnaíba, de intrusões ígneas em perfis elétricos, assim como em dados de sísmica 2D.

## perfis elétricos x intrusivas

A presença de corpos ígneos intrusivos na seção sedimentar da Bacia do Parnaíba apresenta

assinatura conspícua nos mais variados perfis elétricos disponíveis. A correta caracterização destes corpos nos perfis elétricos traz informações e dados que possibilitam, por exemplo, a distinção entre soleiras e diques.

## raios gama (GR)

A curva de raios gama (GR) é um dos principais perfis elétricos utilizados para a identificação de soleiras na coluna sedimentar da bacia. A análise das curvas de GR de 34 poços da Bacia do Parnaíba mostra que as rochas ígneas atravessadas pelos poços apresentam valores baixos de raios gama, normalmente entre o mínimo de 8 API e o máximo de 82 API. Os valores médios estão em torno de 26 API, e a moda em 22,5 API. Valores acima de 100 API, conforme mostrado no gráfico de raios gama (GR) x sônico (DT; fig. 8), estão associados a interpretações imprecisas dos limites dos corpos ígneos e por este motivo foram descartados desta avaliação. Apesar disto, o contato com a rocha encaixante mostra-se abrupto, permitindo grande precisão na determinação da espessura do corpo ígneo. Também é possível a identificação de apófises de pequena espessura, que geralmente não são identificáveis pela descrição de amostras de calha e pela interpretação sísmica.

Adicionalmente, as soleiras são caracterizadas por um aumento na curva de raios gama (GR) no terço superior da intrusão (fig. 9a). Esta feição é consequência da cristalização mais rápida nas bordas da intrusão, em contraste com a percolação ascendente dos voláteis devido ao resfriamento mais lento no seu interior. Tal padrão foi informalmente chamado de “barriguda” pela Petrobras (informação verbal)<sup>1</sup>, devido à sua forma característica em perfil elétrico. Além desta feição em perfil, outra característica importante das soleiras é a preservação da espessura do pacote sedimentar, tendo em vista que o alojamento destes corpos ocorre pelo soerguimento da seção sobrejacente, com ou sem perda insignificante de seção sedimentar.

Estudos petrográficos e litogeoquímicos de diversas soleiras atravessadas por um poço na Bacia do Parnaíba mostram que as bordas da intrusão apresentam granulação fina, mas sem vidro

<sup>1</sup>Informação fornecida por Mariela Martins (1991).

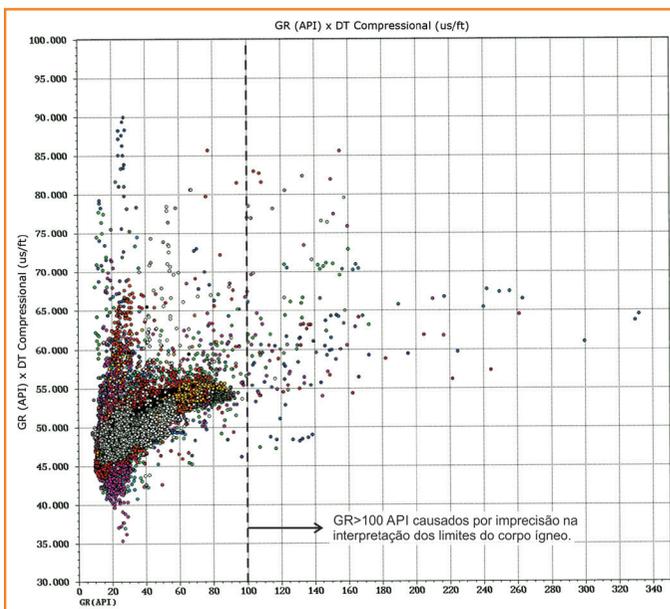


Figura 8 – Gráfico de Raios Gama (GR) x Sônico (DT) com dados de 34 poços da Bacia do Parnaíba.

Figure 8 – Gamma Ray (GR) x Sonic (DT) plot based on 34 (thirty four) wells in the Parnaíba Basin.

vulcânico associado (informação verbal)<sup>2</sup>. No interior do corpo intrusivo há um aumento gradual na granulação dos cristais, sendo que os maiores cristais coincidem com a porção onde a curva de raios gama alcança seu valor mais elevado. Francis (1982) também observa que muitas soleiras com 50m ou mais de espessura, no sul da Escócia, apresentam geralmente zonas com textura “pegmatítica” em seu primeiro terço a partir do contato superior.

Adicionalmente, dados litogeoquímicos (informação verbal)<sup>3</sup> indicam um enriquecimento de urânio (U) e tório (Th) naquela mesma região da soleira. Este mesmo padrão é observado nas curvas de raios gama espectrais, com o aumento significativo de U e Th no terço superior da soleira (fig. 10).

Outro padrão de perfil que pode ser utilizado na identificação de corpos magmáticos em sequências sedimentares é o de “caixote” (fig. 9b). Neste padrão, o perfil de GR segue um valor constante, o qual pode ser interpretado como um evento de rápida cristalização (como um dique; informação verbal)<sup>4</sup>. Além deste padrão em “caixote”, os diques também se caracterizam nos poços pela ausência aparente de seção, devido ao seu contato discordante com as camadas sedimentares, a depender do ângulo de mergulho e espessura do

dique atravessado pelo poço. Este segundo critério de identificação é importante, pois as terminações das soleiras são, normalmente, menos espessas e podem não apresentar o padrão “barriguda”, conforme descrito acima. Na Bacia do Parnaíba ainda não foram identificados diques a partir de dados de poços, embora existam ocorrências mapeadas em campo e através de métodos potenciais.

## sônico (DT)

Ocorre forte diminuição do tempo de trânsito (DT) quando um poço atravessa rochas ígneas intrusivas, sejam diques e/ou soleiras. A média e a moda observadas nos poços selecionados no gráfico da figura 8 são, respectivamente, 48,50us/ft e 47,50us/ft. Um pequeno aumento no tempo de trânsito (DT), em torno de 5us/ft, também é observado na mesma região onde a feição do tipo “barriguda” se forma no perfil de raios gama (GR); a média observada neste intervalo fica ao redor de 52us/ft. Porras *et al.* (2011) descrevem valores médios ligeiramente acima, em torno de 60us/ft, para as intrusivas ígneas da Bacia Austral (Argentina).

Valores maiores responsáveis por picos nas curvas de DT, normalmente entre 70us/ft e 90us/ft, via de regra estão associados à presença de fraturas e/ou alterações (p. ex.: hidrotermais). Não é incomum haver registros de anomalias de gás nos intervalos associados a tais anomalias.

## resistividade

Tanto soleiras quanto diques são caracterizados por elevada resistividade, podendo ultrapassar a escala padrão de 2.000ohm.m. As curvas de resistividade também podem ser alteradas devido à presença de fraturas, alterações causadas por hidrotermalismo e à presença de sulfetos.

Segundo Delpino e Bermúdez (2009), a presença de sulfetos na rocha intrusiva, os quais podem estar finamente disseminados na rocha ou na forma de veios, também pode ocasionar

<sup>2</sup>Informação fornecida por Juliana Costa (2015).

<sup>3</sup>Informação fornecida por Juliana Costa (2015).

<sup>4</sup>Informação fornecida por Mariela Martins (1991).

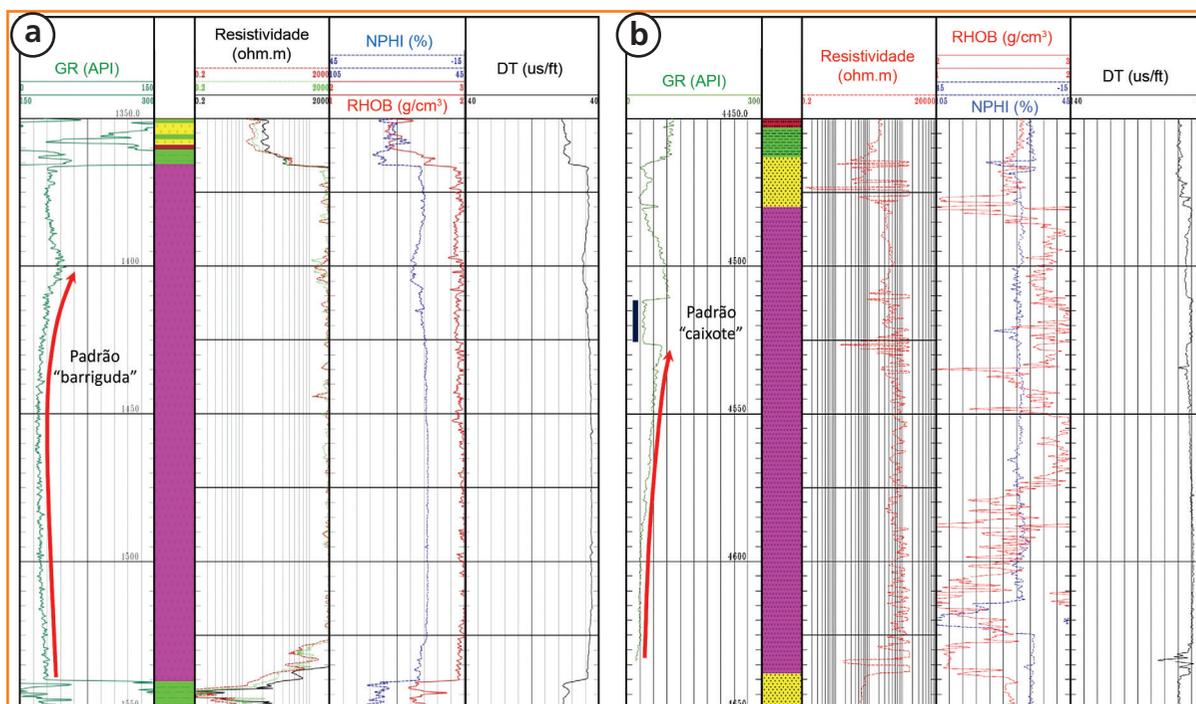


Figura 9 – Perfil elétrico de dois poços com intrusivas ígneas identificadas; (a) exemplo de feição típica de soleira na Bacia do Parnaíba. Notar aumento na curva de raios gama (GR) no terço superior da soleira, caracterizando o padrão “barriguda”; (b) exemplo de feição típica de dique na Bacia do Paraná. Observar que, na porção superior do corpo magmático, o perfil de GR forma o padrão do tipo “caixote”, superimposto ao padrão “barriguda”, e pode ser interpretado como um dique mais novo, intrudido na soleira preexistente.

Figure 9 – Log profile of two wells with intrusive igneous rocks identified; (a) example of a typical sill pattern in the Parnaíba Basin. Note upward increase of the gamma ray log (GR) in the upper third of the sill, characterizing the “paunchy” pattern (“barriguda”); (b) example of typical dike pattern (box) in the Paraná Basin. Note that in the upper portion of the magmatic body, the GR log forms a tabular pattern (box), which can be interpreted as a more recent dike intruded into the preexisting sill.

variações na curva de resistividade, devido à alta condutividade desses minerais. Na rocha hospedeira, intensa alteração na curva de resistividade também é observada. De acordo com Delpino e Bermúdez (2009), se a rocha encaixante contiver matéria orgânica suficiente, o mineral metamórfico grafite pode se formar, afetando as curvas de resistividade devido à sua alta condutividade. No caso das soleiras alojadas na Fm. Pimenteiras, esta alteração é intensificada pela presença de matéria orgânica. Adicionalmente, a Fm. Pimenteiras é conhecida pela presença abundante de pirita (sulfeto), seja disseminada na rocha ou preenchendo fraturas, o que também afeta as curvas de resistividade.

## densidade (RHOB)

As curvas de densidade mostram valores médios elevados, da ordem de  $2,95\text{g/cm}^3$  e moda

de  $2,97\text{g/cm}^3$ . Valores abaixo de  $2,5\text{g/cm}^3$ , conforme ilustrado no gráfico de GR x densidade (fig. 11), estão relacionados a fraturas e/ou arrombamento do poço, os quais prejudicam as leituras da ferramenta.

Alguns poços também apresentam, pontualmente, curvas de densidade com valores acima de  $3,5\text{g/cm}^3$ , podendo chegar a até  $5,6\text{g/cm}^3$  (fig. 11). Segundo Delpino e Bermúdez (2009), soleiras e lacólitos com zonas de diferenciação magmática podem apresentar setores com diferentes densidades de matriz. Da mesma forma que a curva de resistividade é afetada pela presença de sulfetos (pirita), a curva de densidade também pode apresentar variações e picos de alta densidade.

No gráfico de raios gama (GR) x densidade da figura 11, também se nota uma diminuição da densidade com o aumento do GR.

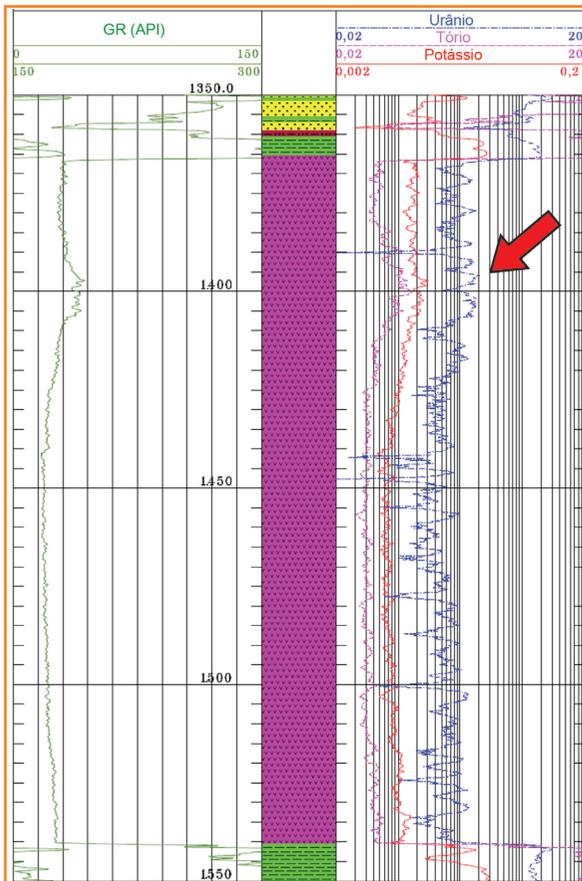


Figura 10 – Perfil de raios gama espectral com curvas de U (urânio), Th (tório) e K (potássio). Observar aumento das curvas de U e Th no terço superior da soleira.

Figure 10 – Spectral gamma ray log, showing U (uranium), Th (thorium) and K (potassium) curves. Note increase of U and Th curves in the upper third of the sill.

## sísmica de reflexão x intrusões

Segundo Planke *et al.* (2005), a interpretação sísmica de intrusões de soleiras difere dos métodos convencionais de mapeamento de horizontes, pois requer a determinação da litologia. Além disto, as soleiras podem se dividir em várias unidades ou se unir em um único corpo. As soleiras também podem cruzar ou cortar o empilhamento estratigráfico, fenômeno chamado na literatura inglesa de *transgressive sill*, cuja tradução literal consideramos inadequada; por este motivo, neste artigo tal modo de ocorrência será denominado “planar inclinada”

ou “salto de soleira”, a fim de evitar dubiedade com definições utilizadas na estratigrafia de sequências e por ser um termo já consagrado no Brasil.

Além da amarração e correlação com os poços disponíveis, na interpretação dos corpos ígneos intrusivos na seção sedimentar da Bacia do Parnaíba foram utilizados os seguintes critérios e ferramentas aplicados aos dados sísmicos 2D:

- presença de eventos com alta amplitude no pacote sedimentar;
- identificação de horizontes claramente caracterizados como “salto de soleira”;
- presença da típica geometria em forma de pires;
- terminação abrupta de reflexões;
- inversão do dado sísmico.

A figura 12 reúne esses critérios, exemplificando o típico padrão de ocorrência das soleiras de diabásio nos sedimentos paleozoicos. Analisando-se o dado sísmico migrado em tempo (PSTM; fig. 12a), as soleiras mostram-se subconcordantes

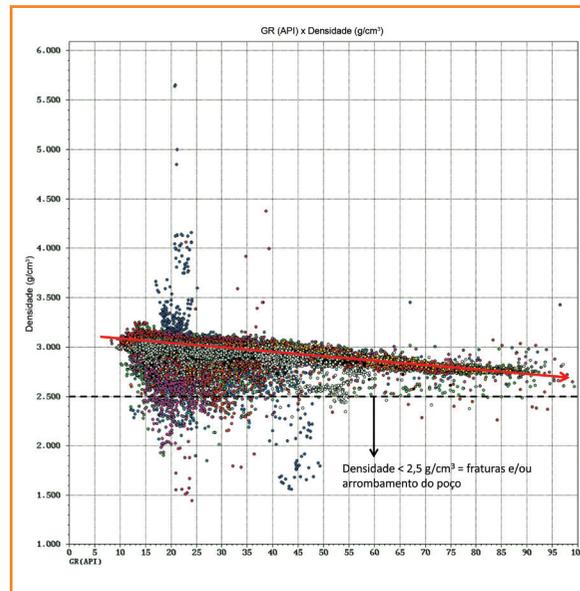


Figura 11 – Gráfico de raios gama (GR) x densidade de soleiras da Bacia do Parnaíba. Notar que densidades abaixo de  $2,5\text{g/cm}^3$  podem indicar a presença de fraturas e/ou arrombamento do poço. Observar tendência de diminuição da densidade com o aumento do GR.

Figure 11 – Gamma ray x density plot of sills from the Parnaíba Basin. Note that densities below  $2.5\text{g/cm}^3$  could indicate fractures and/or wash-outs. Observe tendency for density decrease as GR increases.

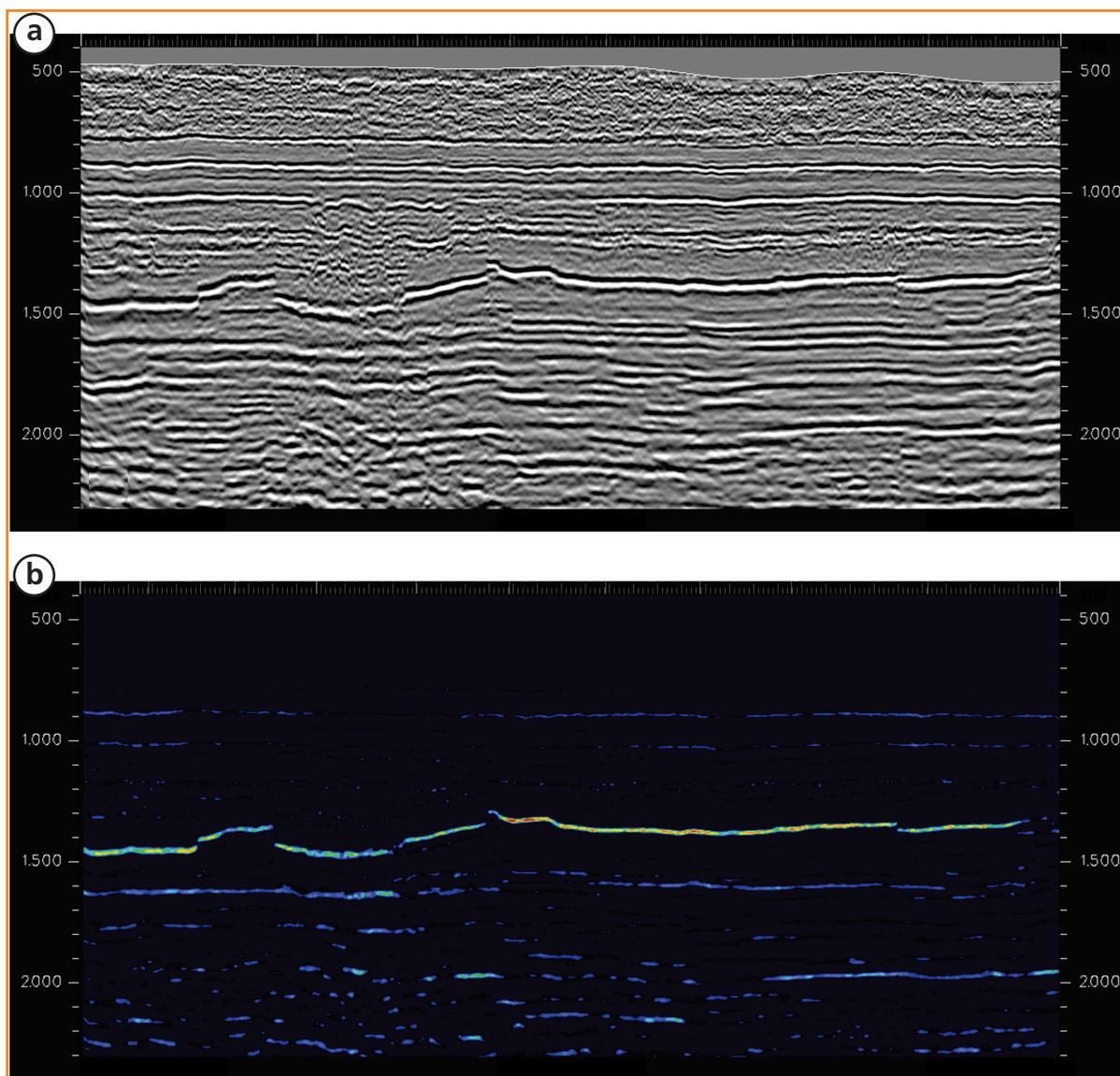


Figura 12 – Seção sísmica migrada (tempo duplo) mostrando o típico padrão de ocorrência das soleiras intrusivas na Bacia do Parnaíba; (a) camadas plano-paralelas intercaladas com refletores de alta amplitude, subconcordantes com as unidades sedimentares paleozoicas; (b) resultado de processamento por inversão acústica do dado sísmico, ressaltando a forte anomalia associada à presença da soleira intrusiva; essa técnica tem se mostrado ideal para a determinação da espessura da soleira, assim como para o seu correto imageamento; nesse caso, vê-se que intrusões aparentemente contínuas parecem estar formadas a partir da justaposição de soleiras menores, com forma de pires.

Figure 12 – Double-time seismic profile showing a typical pattern for the intrusive sills within Parnaíba Basin; (a) paleozoic flat sedimentary units interbedded with strong amplitude reflectors; (b) acoustic inversion processing of the conventional seismic data shows a strong anomaly related to the intrusive sill; this technique has been found ideal for determination of the sill thickness, as well as correct imaging. In this case, it is seen that apparently continuous intrusions appear to be formed by the juxtaposition of a series of minor saucer-shaped sills.

com os estratos sedimentares, embora sejam observados trechos onde o refletor principal parece “saltar” para as camadas sobrejacentes, ocupando interfaces entre níveis stratigráficos distintos. Por meio de processamento especial por inversão

acústica dos dados sísmicos convencionais (fig. 12b), observa-se forte anomalia de amplitude positiva no topo das intrusões. Esta técnica tem se mostrado ideal para a determinação da geometria e espessura das soleiras; nesse caso, vê-se que

soleiras aparentemente contínuas parecem estar formadas por meio da justaposição de soleiras menores, com forma de pires. Também é possível reconhecer a presença de soleiras menos espessas (anomalias de amplitude pouco conspícuas, abaixo da soleira superior). Da mesma forma, é possível identificar um par de sinal anômalo na porção superior da seção sísmica (entre 900m e 1.000m) que corresponde à presença de camadas de anidrita na sequência neocarbonífera-permiana da bacia (Grupo Balsas), a qual foi constatada em vários poços exploratórios. As camadas de anidrita, na inversão acústica (fig. 12b), respondem com anomalias de amplitude próximas às das soleiras de diabásio, requerendo cuidados adicionais na interpretação nos casos onde ambas as litologias ocorrem intercaladas aos sedimentos siliciclásticos. Por causa das frequências dominantes em dados sísmicos terrestres (25Hz), soleiras pouco espessas podem não ser resolvidas adequadamente (definição do topo e da base da camada).

## geometria dos corpos intrusivos

Para alguns autores, a geometria básica das soleiras é a forma de pires (*saucer-shape*; Francis, 1982). Contudo, Planke *et al.* (2005) definiram nove fácies de soleiras em trabalho nas bacias de Vøring e Møre, na Noruega, as quais podem ser subdivididas em quatro grupos:

- i)** “paralela à camada” (*layer parallel*);
- ii)** em forma de pires (*saucer-shaped*);
- iii)** planar inclinada (*planar transgressive*);
- iv)** bloco falhado (*fault block*).

Todas as geometrias e as fácies descritas por Planke *et al.* (2005) são amplamente identificadas na Bacia do Parnaíba (tabela 1 e fig. 13).

Na Bacia do Parnaíba, as soleiras de diabásio intrudem paralelamente a espessos pacotes de folhelhos, geralmente na interface entre as formações Longá-Poti, Pimenteiras-Cabeças e Tianguá-Jaicós, o que sugere algum tipo de controle pelas espessas camadas pelíticas predominantes nas primeiras (formações Longá, Pimenteiras e Tianguá).

Porto (2013), em mapeamento sísmico realizado em dez linhas 2D de fomento da ANP na

	Fácies	Descrição
(1)	Plano-paralelo	Soleiras plano-paralelas que ocorrem em zonas mais profundas com alta amplitude e grande continuidade.
(2)	Paralelo à bacia	Semelhante à fácies (8), mas a forma de pires é definida pela estratigrafia da bacia.
(3)	Pires raso	Soleira predominantemente plano-paralela com segmentos inclinados nas pontas.
(4)	Plano-paralelo irregular	Diversas soleiras plano-paralelas, mas que se conectam localmente por segmentos inclinados.
(5)	Planar inclinada	Corpos ígneos contínuos e planares que “cortam” estratos concordantes.
(6)	Intrusões rasas	Em sísmica, esta fácies apresenta-se em forma de pires estreito/apertado e ocorre nas porções mais rasas.
(7)	Pires irregular	Soleira em forma de pires que se distingue da fácies (1) por ocorrer em níveis mais profundos e mais largos.
(8)	Pires ascendente	Esta fácies é um estágio intermediário entre as fácies em forma de pires e planar inclinada. No geral, estas soleiras apresentam forma de pires, mas um dos lados é mais raso, resultando em uma aparência ascendente.
(9)	Bloco falhado	Eventos de alta amplitude dentro de blocos falhados. Reflexões das soleiras tendem a seguir os planos de falhas e zonas de fraqueza na estratigrafia.

região sudeste da Bacia do Parnaíba, identificou três tipos de soleiras, as quais foram classificadas quanto à idade das encaixantes e à geometria apresentada. As principais geometrias observadas foram:

- i)** forma de pires;
- ii)** inclinada ou “transgressiva”;
- iii)** salto de soleira.

A grande maioria das soleiras intrusivas na seção sedimentar discutidas neste trabalho são englobadas na Fm. Mosquito, portanto correlacionáveis ao magmatismo *Central Atlantic Magmatic Province* (Camp), importante evento relacionado à abertura do Atlântico Central na passagem Triássico-Jurássico (~200 Ma; Hames *et al.*, 2003; Merle *et al.*, 2011). No entanto, a presença de intrusões mais jovens, de idade eocretácea e relacionadas à Fm. Sardinha (~132 Ma), não pode ser descartada. A presença de diques subverticais que cortam toda a seção sedimentar e estão claramente alinhados (em mapas magnéticos regionais e de lineamentos) com manifestações daquela idade, aflorantes na porção centro-sudeste da bacia, reforça essa possibilidade.

Apesar da grande variedade de geometrias presentes (fig. 13), predomina nas soleiras da Bacia do Parnaíba o tipo “paralela à camada”

**Tabela 1**

Fácies sísmicas típicas de soleiras (adaptado de Planke *et al.*, 2005).

**Table 1**

Typical sill seismic facies (modified from Planke *et al.*, 2005).

Figura 14

Anomalias de amplitudes positivas marcam a presença de soleiras plano-paralelas, concordantes com os estratos sedimentares. Notar a presença, em torno de 1.200m (imediatamente acima do topo da Fm. Poti), de feição descrita na literatura como “estrutura gaivota” (Zalán et al., 1985) formada por refletores simetricamente ondulados pela presença de um dique (mal imageado, possivelmente por resolução sísmica inadequada).

Figure 14

Strong positive amplitude anomalies correspond to flat, layer parallel sills, in accordance with the sedimentary strata. Note the presence, at around 1,200m (immediately above the top of Fm. Poti, of a feature described in literature as a “seagull structure” (Zalán et al., 1985), formed by reflectors, symmetrically wavy caused by the presence of a dike (poor image, possibly due to inadequate seismic resolution).

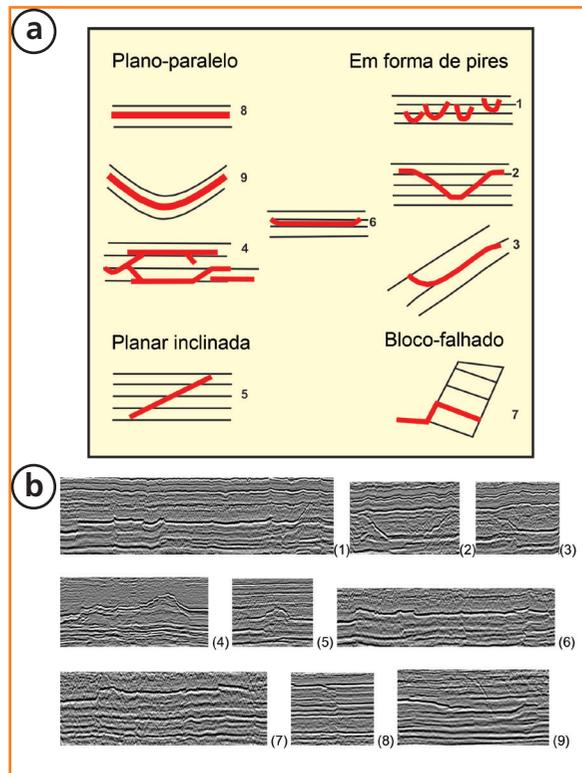
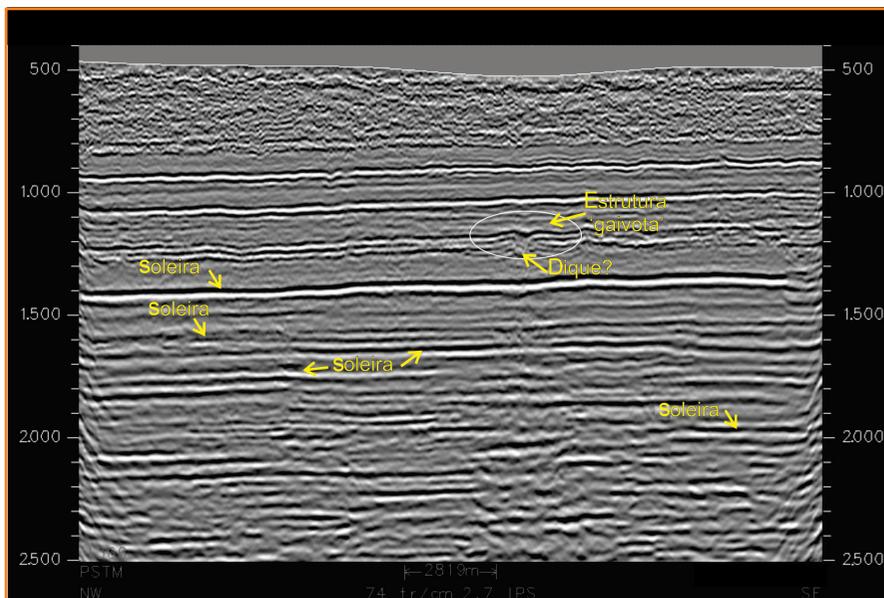


Figura 13 – (a) Quadro esquemático mostrando a configuração das fácies de soleiras identificadas nas bacias de Vøring e Møre (Planke et al., 2005); (b) possíveis análogos na Bacia do Parnaíba (seções sísmicas fora de escala).

Figure 13 – (a) Sketch showing the configuration of sill facies identified in the Vøring and Møre basins (Planke et al., 2005); (b) identical forms identified in the Parnaíba Basin (seismic profiles out of scale).



(layer parallel). Esses corpos intrusivos podem atingir de dezenas a até algumas centenas de quilômetros de extensão, com espessura que varia de 2-5m até 250-300m (fig. 14). Em muitos casos, é possível interpretar o controle estrutural de fraturas no alojamento das soleiras, assim como o seu deslocamento por deformações posteriores (fig. 15).

Muito frequentes também são as intrusões de soleira em “forma de pires” (*saucer-shaped*). Nas seções sísmicas, caracterizam-se por apresentar base plana e bordas ligeiramente arqueadas, ao estilo de um pires raso, podendo alcançar desde dezenas de metros a extensões quilométricas (fig. 16).

Feições do tipo “planar inclinada” (*planar transgressive*) há muito têm sido identificadas nas sinéclises intracontinentais brasileiras (Conceição et al., 1993), sendo até mesmo usadas com conotação exploratória, conforme será discutido a seguir. Comumente chamado de “saltos de soleira”, esse padrão geométrico também ocorre bem distribuído na Bacia do Parnaíba, destacando-se as intrusões de maior amplitude nos grabens precursores subjacentes à seção paleozoica da bacia; tais grabens possuem provável idade cambriana, por correlação com a Bacia de Jaibaras, aflorante na porção NE da sinéclise do Parnaíba (Oliveira e Mohriak, 2003; Pedrosa Junior et al., 2015). Na área de ocorrência de riftes precursores, sotopostos aos sedimentos paleozoicos ao longo do Lineamento Transbrasiliano (Morais Neto et al., 2013; Castro et al., 2014), as intrusões geralmente concentram-se na seção pré-siluriana que preenche as calhas tectônicas, a qual parece “capturar” as rochas magmáticas nos seus estratos, impedindo-os de se propagarem para os sedimentos paleozoicos subjacentes (fig. 17).

Apesar da posição subvertical, que não favorece o imageamento pela aquisição sísmica, algumas feições intrusivas podem ser interpretadas como diques e *pipes*. Quando restritos à seção sedimentar paleozoica, são interpretados como diques alimentadores das soleiras sub-horizontais (magmatismo jurássico, datado em ~200 Ma). Geralmente, caracterizam-se por perda de qualidade sísmica e por causarem descontinuidade nos refletores, por vezes apresentando-se empilhados com padrão de “v” invertido, formando feições verticais discordantes do acamamento sedimentar plano-paralelo (fig. 18).

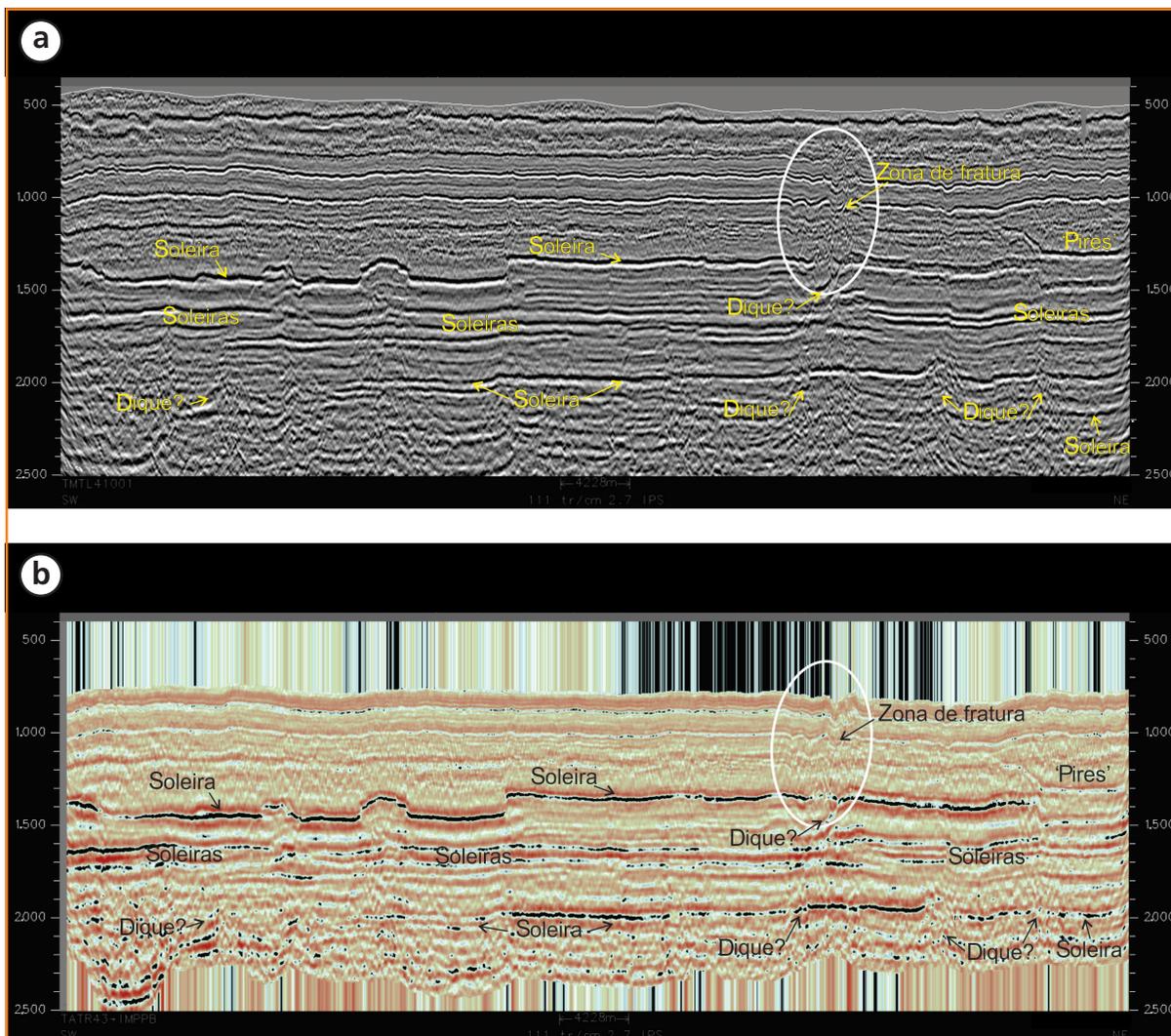


Figura 15 – Soleiras de diabásio “plano-paralelas” e “falhadas”, intrudidas nas seqüências devoniana-eocarbonífera (Gr. Canindé) e siluriana (Gr. Serra Grande). Na porção direita da seção sísmica, possíveis reativações pós-Jurássico também são evidenciadas por zona de cisalhamento frágil que afeta todo o pacote sedimentar. (a) Dados sísmicos convencionais (PSTM; migração pré-empilhamento), destacando-se as fortes amplitudes positivas associadas às soleiras; (b) processamento por inversão acústica da mesma seção sísmica; notar o padrão falhado da soleira superior, sugerindo o aproveitamento das fraturas no posicionamento da intrusão.

Figure 15 – Diabase “layer parallel” and “fault block” sills intruded into the Devonian-early Carboniferous (Canindé Group) and Silurian (Serra Grande Group) sequences. Note a conspicuous brittle shear zone on the right hand, which deforms the entire sedimentary sequence; (a) Conventional, pre-stack time migrated (PSTM) seismic data show strong positive amplitude related to the sills; (b) acoustic inversion processing from the same seismic section; note the fault block pattern in the upper sill, suggesting that brittle deformation controlled sill emplacement.

Intrusões verticais também ocorrem associadas a zonas de fraturas que deformam todo o pacote sedimentar, apontando para reativações mais jovens (fig. 19). Tais estruturas às vezes parecem estar preenchidas por material magmático, uma vez que estão relacionadas a anomalias

magnéticas compatíveis com as direções de diques cretáceos aflorantes e datados em torno de 130 Ma. Em outros casos, são preservadas evidências que sugerem a presença de corpos mais espessos, como *pipes* ou *plugs* magmáticos de formato cônico.

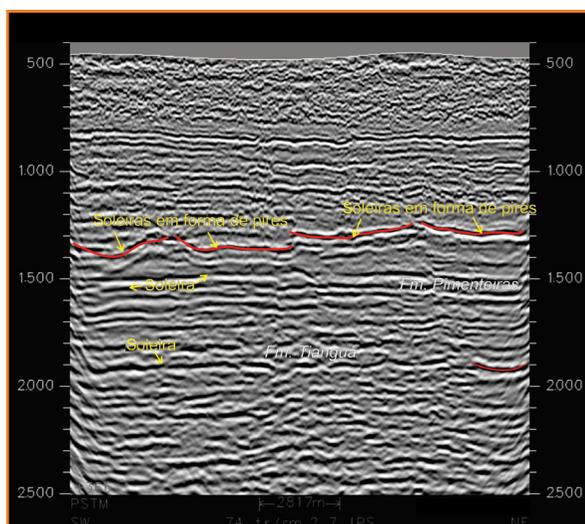


Figura 16 – Conjunto de soleiras em “forma de pires” entre 1.200m-1.400m, intrusivas na sequência devoniana (Fm. Cabeças). Abaixo destas, ocorrem soleiras planares intrusivas na Fm. Pimenteiras (~1.500m-1.700m) e uma extensa e contínua soleira basal, intrusiva na sequência siluriana (Fm. Tianguá).

Figure 16 – Saucer-shaped sills occur between 1,200m and 1,400m, intruded into the Devonian sequence (Cabeças Fm.). Below those, layer parallel sills intruded into the Pimenteiras Fm. (~1,500m-1,700m), and a continuous, widespread bottom sill occurs into the Silurian sequence (Tianguá Fm.).

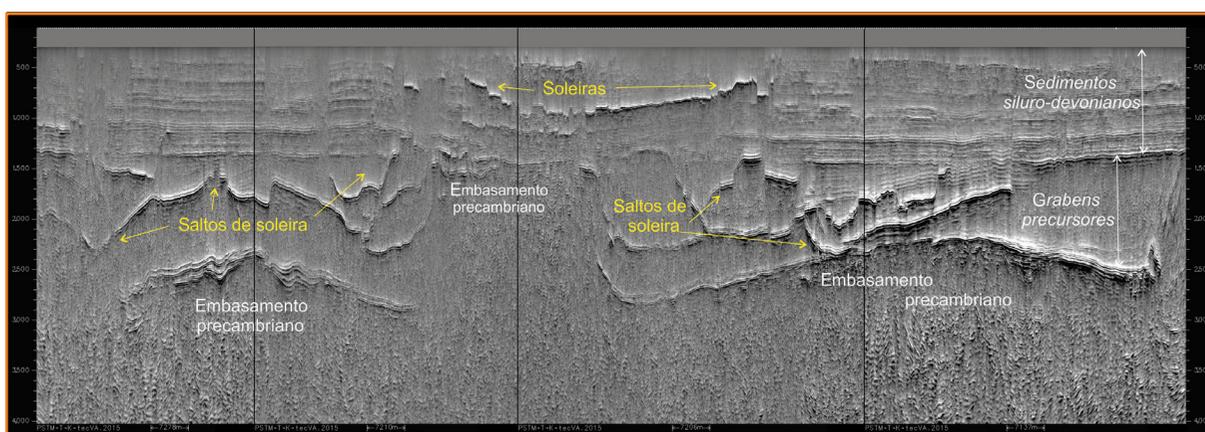


Figura 17 – Imagem sísmica “TecVA” (Bulhões, 1999; Bulhões e Amorim, 2005) na área SE da Bacia do Parnaíba. Notar que as amplitudes mais proeminentes representam soleiras que se deslocam verticalmente (“saltam”) no interior do pacote sedimentar. Nesta porção da bacia, as intrusões concentram-se no interior dos grabens mais antigos, com pouca expressão na seção paleozoica sobrejacente.

Figure 17 – TecVA image (Bulhões, 1999; Bulhões and Amorim, 2005) from the southeastern Parnaíba Basin. Note that the strong amplitude represents sills which “jump” into the sedimentary column. In this portion of the basin, most intrusions concentrate into older grabens and are less common in Paleozoic sediments.

## distribuição e mecanismos de alojamento das soleiras na Bacia do Parnaíba

Dados de poços, sísmica 2D e de afloramento mostram que os registros dos eventos magmáticos da Bacia do Parnaíba apresentam ampla distribuição geográfica e estratigráfica. Na porção oeste da bacia, em um quadrante delimitado pelas cidades de Imperatriz (MA), Grajaú (MA), Balsas (MA) e

Araguaína (TO), concentra-se a maioria dos afloramentos de derrames basálticos da Fm. Mosquito (ca. 200 Ma; Evento *Camp*). Coincidentemente, nesta porção da bacia há menor incidência de soleiras de diabásio, conforme observado tanto em poços quanto em dados sísmicos. Por sua vez, a porção central da Bacia do Parnaíba é marcada por completa ausência de derrames basálticos, enquanto as soleiras de diabásio atingem espessuras individuais da ordem de uma ou duas centenas de metros. As intrusões são tão frequentes nesta porção da bacia que quase a totalidade dos poços ali perfurados registra a presença de um ou mais corpos intrusivos,

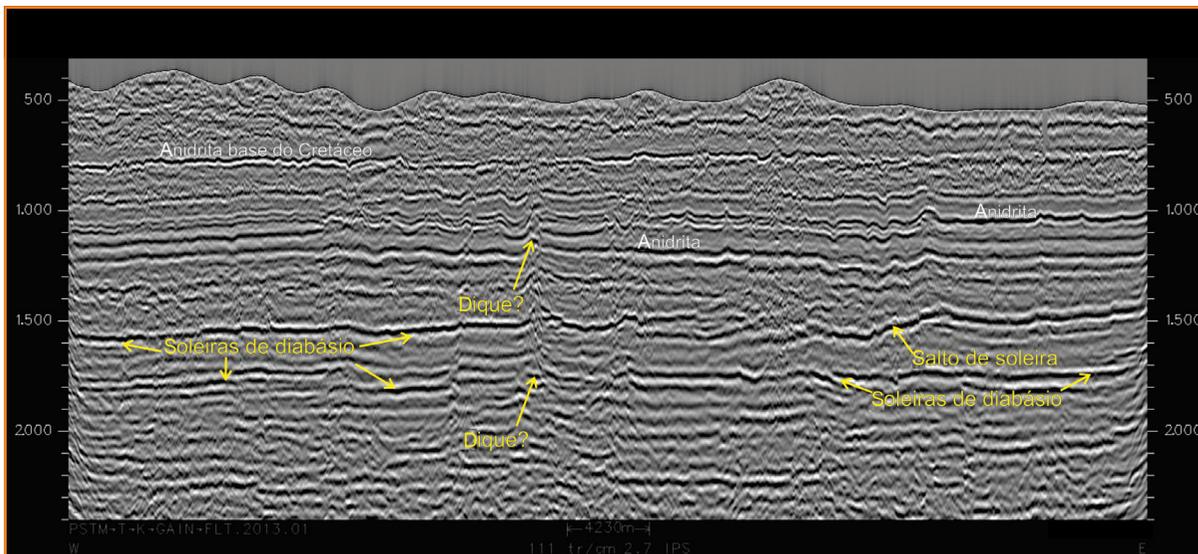


Figura 18 – Feição sugestiva de dique subvertical que corta discordantemente os estratos sedimentares na porção central da seção sísmica. O dique é de possível idade jurássica, uma vez que está associado às soleiras de diabásio de mesma idade, além de intrudir apenas a seção paleozoica.

Figure 18 – A feature suggesting a subvertical dike cuts the whole sedimentary strata in the central portion of the seismic profile. It is possibly Jurassic in age, as it is related to the diabase sills and restricted to the Paleozoic sequences.

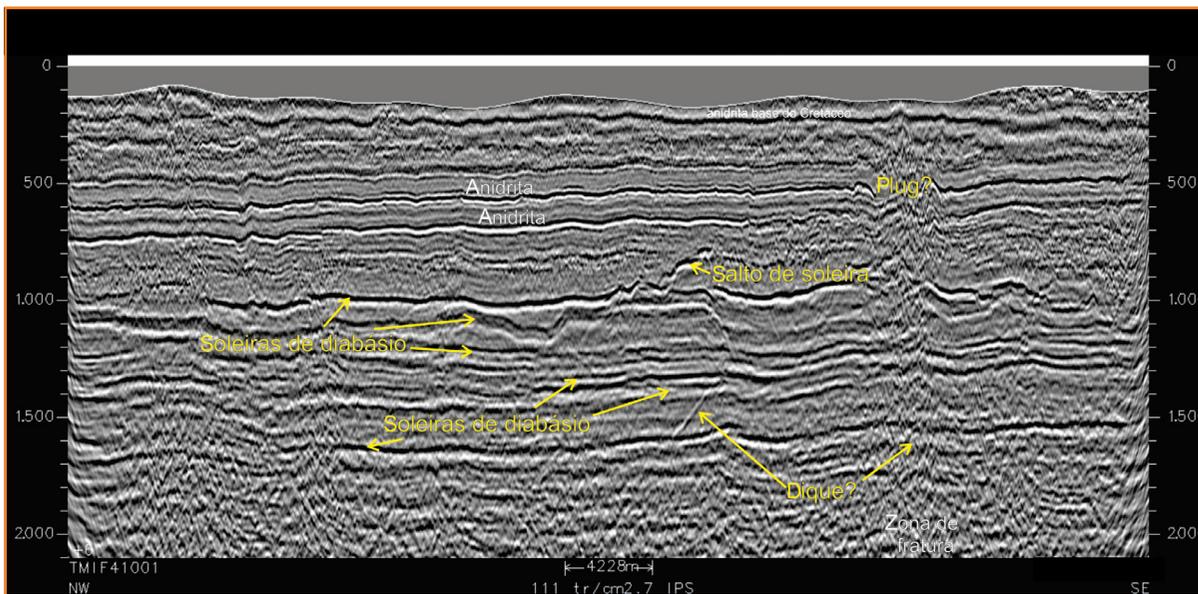


Figura 19 – Na porção direita da seção sísmica, observam-se feições do tipo “salto de soleira” ou “planar inclinada”, que podem indicar o sentido de preenchimento/intrusão das soleiras; feições subverticais com forte amplitude também sugerem a presença de diques alimentadores. Uma penetrativa zona de cisalhamento frágil que deforma toda a seção paleozoica é encimada por feição cônica, sugerindo a ocorrência de plug ou pipe magmático, compatível com anomalia magnética existente na área.

Figure 19 – On the right portion of the seismic section jump sills or inclined layer parallel sills can be seen. They could indicate the direction of filling or intrusion of the sills. High amplitude subvertical features may also be interpreted as feeder dikes. A penetrating zone of fragile shearing, which deforms the whole Paleozoic section, lies under a conical feature suggesting the occurrence of a magmatic plug or pipe, compatible with the magnetic anomaly existing in the area.

podendo em alguns casos alcançar espessuras acumuladas de mais de 500m de soleiras, intrudidas nas mais diversas unidades estratigráficas. Nesta mesma região, a unidade estratigráfica mais jovem onde há registro de rochas intrusivas é a Fm. Motuca (Eotriássico).

A dicotomia na distribuição geográfica dos registros do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba é intrigante: derrames basálticos ocupam depressões do centro-oeste, enquanto soleiras e diques se entremeiam às unidades paleozoicas no centro e bordas sudeste, leste e nordeste da bacia. Embora não se possa descartar por completo a remoção por erosão de possíveis derrames ocorridos no leste da bacia, é possível relacionar os derrames aflorantes no centro-oeste a um possível efeito de alívio das pressões magmáticas que promovem intrusões ígneas. Ou seja, os processos de ascensão (e intrusão) magmática ganhariam competência quando o magma não atingisse a superfície, e as pressões vindas da câmara magmática propiciariam uma espécie de suspensão da pilha sedimentar, cujo tensor horizontal mínimo ( $\sigma_3$ ) ocorreria ao longo dos planos de acamamento (descontinuidades litológicas, texturais ou composicionais), facilitando a ampla propagação magmática na forma de soleiras. Ainda não estão claros os controles desta dicotomia, mas a menor espessura sedimentar na porção centro-oeste da bacia deve ter facilitado a ascensão do magma. Além disso, zonas de fraqueza associadas à Faixa Paraguai-Araguaia também devem ter tido papel relevante no controle dos derrames desta porção da bacia.

As zonas preferenciais de intrusão coincidem com as interfaces das formações Longá-Poti, Tianguá-Jaicós e Pimenteiras-Cabeças. Esta coincidência sugere que as propriedades reológicas distintas destas unidades (pelitos x arenitos) podem ter exercido papel importante no alojamento destes corpos intrusivos, conforme preconizado por Gretner (1969). Ademais, o maior volume de rochas intrusivas encontra-se nos folhelhos da Fm. Pimenteiras, os quais também apresentam os maiores teores de matéria orgânica da bacia. O somatório destes fatores – rochas pelíticas (acamamento e tensão estratificada horizontalmente) e teores elevados de matéria orgânica, cujo contato com o magma em altas temperaturas acarreta elevada produção de gás, aumentando a pressão de fluidos e favorecendo a abertura de fendas na rocha encaixante – deve ter exercido papel fundamental no

alojamento destes corpos (Trendall, 1994; Leaman, 1995). O conjunto destes fatores pode ter fornecido as condições necessárias para que uma mesma soleira tenha se estendido por mais de 100km dentro do mesmo nível estratigráfico, conforme pode ser constatado em seções sísmicas e por datações geocronológicas em poços.

Dados disponíveis também sugerem que zonas de cisalhamento regionais podem ter desempenhado papel fundamental no alojamento dos corpos magmáticos (Daly *et al.*, 2014). Neste contexto, o Lineamento Picos-Santa Inês coincide com a ocorrência de diques subverticais de direção NW-SE, que destaca-se como uma possível zona de alimentação (*feeder dikes?*) de soleiras da Fm. Sardinha (Eocretáceo), como, por exemplo, a soleira aflorante nas imediações da cidade de Picos (PI). Adicionalmente, os diques alimentares das soleiras da Fm. Mosquito (Jurássico) apresentam direção NE-SW, perpendiculares aos lineamentos NW-SE da bacia, que neste tempo estavam sob regime transpressivo.

## o uso exploratório das soleiras

A associação entre intrusões magmáticas e reservatórios há décadas tem sido apontada como um modelo de acumulação viável na indústria do petróleo. Nas bacias paleozoicas brasileiras, vários autores têm abordado a descrição e geometria das ocorrências magmáticas (corpos intrusivos e extrusivos), assim como seu potencial exploratório (Linsner 1973; Conceição *et al.*, 1993; Wanderley Filho *et al.*, 2006; Thomaz Filho *et al.*, 2008; entre outros).

Desenvolvido e por muito tempo utilizado internamente na Petrobras, o modelo exploratório de trapeamento por soleiras de diabásio vem sendo testado com sucesso por várias companhias (Cunha *et al.*, 2012), tendo se consolidado como um modelo preferencial para exploração na Bacia do Parnaíba. Um dos alvos exploratórios mais comuns está relacionado ao trapeamento provocado pela geometria do tipo “salto de soleira”. Reconhecido em várias escalas, esse tipo de trapeamento caracteriza-se pela formação de altos estruturais capeados por camadas de diabásio, as quais podem desempenhar o papel de camada selante para os reservatórios abaixo aprisionados (fig. 20); pode estender-se por dezenas de quilômetros,

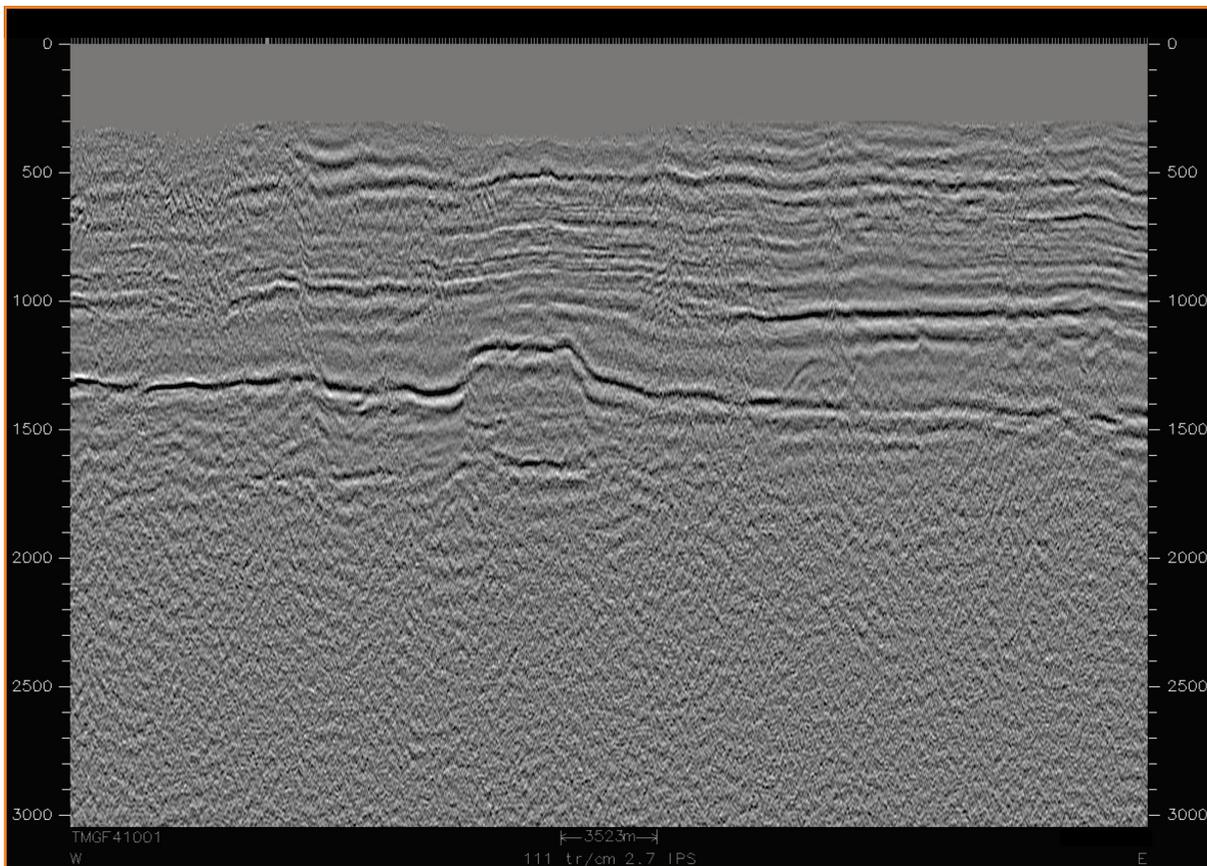


Figura 20 – Exemplo de alvo exploratório potencial na Bacia do Parnaíba. Intrusões planares-inclinadas (“saltos de soleira”) podem eventualmente se justapor ou se amalgamar, trapeando reservatórios abaixo das camadas de diabásio, as quais desempenhariam o papel de rocha selante. Notar arqueamento das camadas acima da intrusão.

*Figure 20 – Example of potential exploratory target in the Parnaíba Basin. Planar transgressive intrusion (“jumping sills”) may amalgamate or combine to trap reservoir sealed by diabase layers, which fulfil the role of sealing the rock. Note bulge of layers above intrusion.*

com relevo vertical podendo alcançar algumas dezenas de metros.

Outro elemento do sistema petrolífero fortemente influenciado pela presença das intrusivas é a rocha geradora. Dados de reflectância de vitrinite (Ro) mostram forte influência do calor destes corpos ígneos na geração de hidrocarbonetos gasosos na Bacia do Parnaíba. Wanderley Filho *et al.* (2006), em trabalho sobre as bacias paleozoicas brasileiras, sugerem que um dos aspectos positivos da presença de intrusivas nestas bacias foi o calor adicional proporcionado pelas rochas ígneas para a transformação da matéria orgânica em petróleo. No caso da Bacia do Parnaíba, é comum encontrarmos, seja em sísmica, poço ou

em afloramento, corpos tabulares de diabásio intrudindo o principal nível gerador da bacia, ou seja, os folhelhos ricos em matéria orgânica da Fm. Pimenteiras. O contato direto entre a rocha geradora e o magma, cujo calor pode atingir até 1.000°C, resulta principalmente na geração de gás seco.

Um aspecto ainda pouco compreendido, devido em grande parte à baixa cobertura de sísmica 3D na bacia, é a influência das soleiras e diques na migração de hidrocarbonetos (óleo e/ou gás). Diques e soleiras constituem importantes barreiras de fluxo, e a caracterização de sua geometria, espessura e distribuição é fundamental para o sucesso exploratório da bacia.

## conclusão

A Bacia do Parnaíba apresenta uma rica e variada história deposicional (ambiente sedimentar), magmática (soleiras e diques) e estrutural (fraturas). Particularmente, dois importantes eventos magmáticos, um na passagem Triássico-Jurássico (ca. 200 Ma) e outro no Eocretáceo (ca. 130 Ma), agrupados respectivamente nas formações Mosquito e Sardinha, produziram grande variedade de corpos intrusivos (soleiras e diques) que se alojam desde os grabens precursores da bacia até nos sedimentos da Fm. Motuca (Eotriássico). Contudo, as zonas preferenciais de intrusão coincidem com as interfaces pelíticas e arenosas das formações Longá-Poti, Tianguá-Jaicós e Pimenteiras-Cabeças, sendo que a Fm. Pimenteiras apresenta o maior volume de rochas intrusivas de toda a seção sedimentar da bacia.

Nos poços analisados, as soleiras apresentam uma assinatura conspícua nos mais variados perfis elétricos (GR, resistividade, densidade e sônico). Geralmente, as soleiras são caracterizadas por um aumento na curva de raios gama (GR) no terço superior da intrusão (formando o padrão “barriguda”); nesta porção, há evidências de enriquecimento de U (urânio) e Th (tório), além de um aumento na granulação dos cristais. Em dados sísmicos 2D, as soleiras apresentam grande variedade de geometrias (p. ex.: forma de pires, planar inclinada, bloco falhado, etc.), embora predomine nas soleiras da Bacia do Parnaíba o tipo “paralela à camada” (*layer parallel*).

As intrusões magmáticas desempenham papel fundamental no sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba. Sua influência abrange desde:

- i) o fornecimento de calor necessário à geração de hidrocarboneto (gás);
- ii) a formação de trapas capazes de armazenar e reter quantidades comerciais de hidrocarbonetos;
- iii) a construção de rotas efetivas de migração e focalização para as trapas geradas por salto de soleira.

## agradecimentos

Agradecemos à Petrobras pela autorização para publicação deste trabalho. Os geofísicos André

E. Calazans M. de Souza e Erick Talarico Costa e Silva contribuíram com importantes melhorias para o imageamento sísmico dos corpos intrusivos. As discussões com o geofísico Jorge Rui C. de Menezes ensejaram a consolidação dos modelos e da terminologia adotada, assim como foram essenciais para a linha de interpretação seguida neste trabalho. Também gostaríamos de agradecer a Andressa G. dos Santos Araújo pelo auxílio na confecção de várias figuras do artigo. Os autores expressam seus agradecimentos aos revisores Julio Cezar Horta de Almeida e Maria Cristina de Vito Nunes pelas sugestões e correções dos manuscritos.

## referências bibliográficas

ABLAY, G. J.; CLEMENS, J. D.; PETFORD, N. Large-scale mechanics of fracture-mediated felsic magma intrusion driven by hydraulic inflation and buoyancy pumping. In: THOMSON, K.; PETFORD, N. (Ed.). **Structure and emplacement of high-level magmatic system**. London: The Geological Society, 2008. p. 3-29. (Special Publication, 302).

ANDERSON, E. M. **The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain**. 2nd. ed. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1951. 206 p.

AWDANKIEWICZ, M.; BREITKREUZ, C.; EHLING, B. C. Emplacement textures in Late Palaeozoic andesite sills of the Flechtingen-Roblau Block, north of Magdeburg, Germany. In: BREITKREUZ, C.; PETFORD, N. (Ed.). **Physical geology of high-level magmatic systems**. London: The Geological Society, 2004. p. 51-66. (Special Publication, 234).

BELL, B.; BUTCHER, H. On the emplacement of sill complexes: evidence from the Faroe-Shetland Basin. In: JOLLEY, D. W.; BELL, B. R. (Ed.). **The North Atlantic Igneous Province: stratigraphy, tectonic, volcanic and magmatic processes**. London: The Geological Society, 2002. p. 307-329. (Special Publication, 197).

BRADLEY, J. Intrusion of major dolerite sills. **Transactions of the Royal Society of New Zealand**, Wellington, v. 3, n. 4, p. 27-55, 1965.

- BULHÕES, E. M. Técnica “volume de amplitudes” para mapeamento de feições estruturais. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., 1999, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1999.
- BULHÕES, E. M.; AMORIM, W. N. Princípio da sismocamada elementar e sua aplicação à técnica de volume de amplitudes (tecVA). In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 9., 2005, Salvador. **Expanded abstract.** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2005. p. 1382-1387.
- BUNGER, A. P.; JEFFREY, R. G.; DETOURNAY, E. Evolution and morphology of saucer-shaped sills in analogue experiments. In: THOMSON, K.; PETFORD, N. (Ed.). **Structure and emplacement of high-level magmatics.** London: The Geological Society, 2008. p. 109-120. (Special Publication, 302).
- BURCHARDT, S. New insights into the mechanics of sill emplacement provided by field observations of the Njardvik Sill, Northeast Iceland. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Amsterdam, v. 173, n. 3-4, p. 280-288, June 2008.
- BURCHARDT, S. **Mechanisms of magma emplacement in the upper crust.** 2009. 124 f. Thesis (Doktorgrades der Mathematisch)- Naturwissenschaftlichen Fakultäten der Georg-August, Universität zu Göttingen, Göttingen, 2009.
- CARTWRIGHT, J.; HANSEN, D. M. Magma transport through the crust via interconnected sill complexes. **Geology**, v. 34, n. 11, p. 929-932, Oct. 2006.
- CASTRO, D. L.; FUCK, R. A.; PHILLIPS, J. D.; VIDOTTI, R. M.; BEZERRA, F. H. R.; DANTAS, E. L. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 614, n. 18, p. 128-145, Feb. 2014.
- CHEVALLIER, L.; WOODFORD, A. Morph-tectonics and mechanism of emplacement of the dolerite rings and sills of the western Karoo, South Africa. **South African Journal of Geology**, Petroria, v. 102, n. 1, p. 43-54, Mar. 1999.
- CONCEIÇÃO, J. C. J.; ZALÁN, P. V.; DAYAN, H. Deformações em rochas sedimentares induzidas por intrusões magmáticas: classificação e mecanismos de intrusão. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 7 n. 1-4, p. 57-91, jan./dez. 1993.
- CORAZZATO, C.; GROPELLI, G. Depth, geometry and emplacement of sills to laccoliths and their host-rock relationships: montecampione group, Southern Alps, Italy. In: BREITKREUZ, C.; PETFORD, N. (Ed.). **Physical geology of high-level magmatic systems.** London: The Geological Society, 2004. p. 175-194. (Special Publication, 234).
- CUNHA, P. R. C.; BIANCHINI, A. R.; CALDEIRA, J. L.; MARTINS, C. C. Parnaíba Basin, the awakening of a giant. In: SIMPOSIO BOLIVARIANO EXPLORACIÓN PETROLERA EM LAS CUENCAS SUBANDINAS, 11., 2012, Cartagena de Indias. **Expanded Abstracts...** Bogotá: Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, 2012.
- DALY, M. C.; ANDRADE, V.; BAROUSSE, C. A.; COSTA, R.; MCDOWELL, K.; PIGGOTT, N.; POOLE, A. J. Brasiliano crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: results of a deep seismic reflection profile. **Tectonics**, Washington, v. 33, n. 11, p. 2102-2120, Nov. 2014.
- DEL PINO, D. H.; BERMÚDEZ, A. M. Petroleum system including unconventional reservoirs in intrusive igneous rocks (sills and laccoliths). **The Leading Edge**, Tulsa, v. 28, n. 7, p. 804-811, July 2009.
- FRANCIS, E. H. Magma and sediment-I emplacement mechanism of late Carboniferous tholeiite sills in northern Britain. **Journal of the Geological Society**, London, v. 139, n. 1, p. 1-20, Feb. 1982.
- GALERNE, C. Y.; NEUMANN, E.-R.; PLANKE, S. Emplacement mechanisms of sill complexes: information from the geochemical architecture of the Golden Valley Sill Complex, South Africa. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, Amsterdam, v. 177, n. 2, p. 425-440, Oct. 2008.
- GALERNE, C. Y.; NEUMANN, E.-R.; PLANKE, S. Magmatic differentiation processes in saucer-shaped sills: evidence from the Golden Valley Sill in the Karoo Basin, South Africa. **Geosphere**, v. 6, n. 3, p. 163-188, Jun. 2010.
- GRESSIER, J. B.; MOURGUES, R.; BODET, L.; MATHIEU, J. Y.; GALLAND, O.; COBBOLD, P. Control

- of pore fluid pressure on depth of emplacement of magmatic sills: an experimental approach. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 489, n. 1-4, p. 1-13, June 2010.
- GREENER, P. E. On the mechanics of the intrusion of sills. **Canadian Journal of Earth Science**, Ottawa, v. 6, n. 6, p. 1415-1419, Dec. 1969.
- GUDMUNDSSON, A.; LØTVEIT, I. F. Sills as fractured hydrocarbon reservoirs: examples and models. In: SPENCE, G. H.; REDFERN, J.; AGUILERA, R.; BEVAN, T. G.; COSGROVE, J. W.; COUPLES, G. D.; DANIEL, J.-M (Ed.). **Advances in the study of fractured reservoirs**. London: The Geological Society, 2014. p. 251-271. (Special Publications, 374).
- HAMES, W.; MCHONE, J. G.; RENNE, P.; RUPPEL, C. **The Central Atlantic Magmatic Province: insights from fragments of Pangea**. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2003. 267p.
- HANSEN, D. M.; CARTWRIGHT, J. A.; THOMAS, D. 3D seismic analysis of the geometry of igneous sills and sill junction relationships. In: DAVIES, R. J.; CARTWRIGHT, J. A.; STEWART, S. A.; LAPPIN, M.; UNDERHILL, J. R. (Ed.). **3D seismic technology: application to the exploration of sedimentary basins**. London: The Geological Society, 2004. p. 199-208. (Memoirs, 29).
- HUTTON, D. H. W. Insights into magmatism in volcanic margins: bridge structures and a new mechanism of basic sill emplacement - Theron Mountains, Antarctica. **Petroleum Geoscience**, Bath, v. 15, n. 3, p. 269-278, Aug. 2009.
- JOHNSON, A. M.; POLLARD, D. D. Mechanics of growth of some laccolithic intrusions in the Henry Mountains, Utah, I: field observations, Gilbert's model, physical properties and flow of the Magma. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 18, n. 3-4, p. 261-309, July 1973.
- JONES, S. F.; WIELENS, H.; WILLIAMSON, M. C.; ZENTILLI, M. Impact of magmatism on petroleum systems in the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Islands, Nunavut: a numerical modelling study. **Journal of Petroleum Geology**, Beaconsfield, v. 30, n. 3, p. 237-256, July 2007.
- KAVANAGH, J. L.; MENAND, T.; SPARKS, R. S. J. An experimental investigation of sill formation and propagation in layered elastic media. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 245, n. 3-4, p. 799-813, May 2006.
- LEAMAN, D. E. Form, mechanisms and control of a dolerite intrusion near Hobart, Tasmania. **Journal of Geological Society of Australia**, Sydney, v. 22, n. 2, p. 175-186, 1975.
- LEAMAN, D. E. Mechanics of sill emplacement: comments based on the Tasmanian dolerites. **Australian Journal of Earth Sciences**, Victoria, v. 42, n. 2, p.151-155, 1995.
- LINSSER, H. F. H. Um discurso sobre intrusões de diabásio ilustrado por um modelo simplificado. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 16, n. 4, p. 201-219, 1973.
- LISS, D. **Emplacement processes and magma flow geometries of the Whin Sill complex**. 2003. 240 f. Thesis (PhD)– The University of Birmingham, Birmingham, 2003.
- LISS, D.; OWENS, H.; HUTTON, D. H. W. New palaeomagnetic results from Whin Sill complex: evidence for a multiple intrusion event and revised virtual geomagnetic poles for the late Carboniferous for the British Isles. **Journal of the Geological Society**, London, v. 161, p. 927-938, Dec. 2004.
- MALTHE-SØRENSEN, A.; PLANKE, S.; SVENSEN, H.; JAMTVEIT, B. Formation of saucer-shaped sills. In: BREITKREUZ, C.; PETFORD, N. (Ed.). **Physical geology of high-level magmatic systems**. London: The Geological Society, 2004. p. 215-227. (Special Publications, 234).
- MATHIEU, L.; VAN WYK DE VRIES, B.; HOLOHAN, E. P.; TROLL, V. R. Dykes, cups, saucers and sills: analogue experiments on magma intrusion into brittle rocks. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 271, n. 1-4, p. 1-13, July 2008.
- MERLE, R.; MARZOLI, A.; BERTRAND, H.; REISBERG, L.; VERATI, C.; ZIMMERMANN, C.; CHIARADIA, M.; BELLINI, G.; ERNESTO, M. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages and Sr-Nd-Pb-Os geochemistry of CAMP tholeiites from Western Maranhão basin (NE Brazil). **Lithos**, Amsterdam, v. 122, n. 3-4, p. 137-151, Mar. 2011.
- MONREAL, F. R.; VILLAR, H. J.; BAUDINO, R.; DELPINO, D.; ZENCICH, S. Modeling an atypical

petroleum system: a case study of hydrocarbon generation, migration and accumulation related to igneous intrusions in the Neuquen Basin, Argentina. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 26, n. 4, p. 590-605, Apr. 2009.

MORAIS NETO, J. M.; TROSDTORF JUNIOR, I.; SANTOS, S. F.; VASCONCELOS, C. S.; MENEZES, J. R. C.; RIBAS, M. P.; IWATA, S. A. Expressão sísmica das reativações tectônicas do lineamento transbrasiliiano na Bacia do Parnaíba. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 14., 2013, Chapada dos Guimarães. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2013.

MUDGE, M. R. Depth control of some concordant intrusions. **Geological Society of America Bulletin**, New York, v. 79, n. 3, p. 315-322, Mar. 1968.

NEUMANN, E.-R.; PLANKE, S.; MALTHE-SØRENSEN, A. **Emplacement mechanisms and magma flows in sheet intrusions in sedimentary basins**. Oslo: University of Oslo, 2003. p. 1-10. VBPR Report.

NEUMANN, E.-R.; SVENSEN, H.; GALERNE, C. Y.; PLANKE, S. Multistage evolution of dolerites in the Karoo Large Igneous Province, Central South Africa. **Journal of Petrology**, Oxford, v. 52, n. 5, p. 959-984, Apr. 2011.

OLIVEIRA, D. C.; MOHRIAK, W. A. Jaibaras trough: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 20, n. 3-4, p. 351-383, Mar./Apr. 2003.

PARRY, M.; ŠTÍSPKÁ, P.; SCHULMANN, K.; HROUDA, F.; JEŽEK, J.; KRÖNER, A. Tonalite sill emplacement at an oblique plate boundary: northeastern margin of the Bohemian Massif. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 280, n. 1-2, p. 61-81, Oct. 1997.

PEDROSA JUNIOR, N. C.; VIDOTTI, R. M.; FUCK, R. A.; OLIVEIRA, K. M. L.; CASTELO BRANCO, R. M. G. Structural framework of the Jaibaras Rift, Brazil, based on geophysical data. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 58, p. 318-334, Mar. 2015.

PLANKE, S.; RASMUSSEN, T.; REY, S. S.; MYKLEBUST, R. Seismic characteristic and distribution of volcanic intrusions and hydrothermal vent complexes in the Vøring and Møre basins. In: PETROLEUM

GEOLOGY CONFERENCE, 6., 2003, London. **Proceedings...** London: The Geological Society, 2005. p. 833-844.

POLLARD, D. D. Derivation and evaluation of a mechanical model for sheet intrusions. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 233-269, Oct. 1973.

POLLARD, D. D.; JOHNSON, A. Mechanics of growth of some laccolithic intrusions in the Henry Mountains, Utah, II: bending and failure of overburden layers and sill formation. **Tectonophysics**, Amsterdam, v. 18, n. 3-4, p. 311-354, July 1973.

PORRAS, J.; AGÜERA, M.; PÉREZ, A. M.; PAGÁN, F.; BELOTTI, H. Caracterización geológica y potencial petrolífero de los cuerpos ígneos intrusivos de la Cuenca Austral, Argentina. In: CONGRESO DE EXPLORACIÓN Y DESARROLLO DE HIDROCARBUROS, 8., 2011, Mar del Plata. **Trabajos técnicos...** Buenos Aires: Instituto Argentino del Petróleo y Gas, 2011. p. 519-548.

PORTO, A. L. **Mapeamento sísmico de intrusões ígneas na porção Sudeste da Bacia do Parnaíba e suas implicações para um modelo de sistema petrolífero não convencional**. 2013. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geologia)- Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

RATEAU, R.; SCHOFIELD, N.; SMITH, M. The potential role of igneous intrusions on hydrocarbon migration, West of Shetland. **Petroleum Geoscience**, Bath, v. 19, p. 259-272, July 2013.

RUBIN, A. M. Propagation of magma-filled cracks. **Annual Review of Earth and Planetary Science**, Palo Alto, v. 23, p. 287-336, 1995.

SCHOFIELD, N. J.; BROWN, D. J.; MAGEE, C.; STEVENSON, C. T. Sill morphology and comparison of brittle and non-brittle emplacement mechanisms. **Journal of the Geological Society**, London, v. 169, n. 2, p. 127-141, 2012.

SKOGSEID, J.; PEDERSEN, T.; ELDHOLM, O.; LARSEN, B. T. Tectonism and magmatism during NE Atlantic continental break-up: the Vøring margin. In: STOREY, B.C.; ALABASTER, T.; PANKHURST, R.J. (Ed.). **Magmatism and the causes of continental break-up**. London: The Geological Society, 1992. p. 305-320. (Special Publications, 68).

- SVENSEN, H.; CORFU, F.; POLTEAU, S.; HAMMER, Ø.; PLANKE, S. Rapid magma emplacement in the Karoo Large Igneous Province. **Earth and Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 325-326, p. 1-9, Apr. 2012.
- SMALLWOOD, J. R. Back-stripped 3D seismic data: a new tool applied to testing sill emplacement models. **Petroleum Geoscience**, Bath, v. 15, p. 259-268, Aug. 2009.
- SMALLWOOD, J. R.; MARESH, J. The properties, morphology and distribution of igneous sills: modelling, borehole data and 3D seismic from the Faroe-Shetland area. In: JOLLEY, D. W.; BELL, B. R. (Ed.). **The north Atlantic Igneous Province: stratigraphy, tectonic, volcanic and magmatic processes**. London: The Geological Society, 2002. p. 271-306. (Special Publications, v. 197).
- THOMAZ FILHO, A.; MIZUSAKI, A. M. P.; ANTONIOLI, L. Magmatism and petroleum exploration in the Brazilian Paleozoic basins. **Marine and Petroleum Geology**, Guildford, v. 25, n. 2, p. 143-151, Feb. 2008.
- THOMSON, K.; HUTTON, D. Geometry and growth of sill complexes: insights using 3D seismic from the north rockall trough. **Bulletin of Volcanology**, Berlin, v. 66, n. 4, p. 364-375, May 2004.
- THOMSON, K.; SCHOFIELD, N. Lithological and structural controls on the emplacement and morphology of sills in sedimentary basins. In: THOMSON, K.; PETFORD, N. (Ed.). **Structure and emplacement of high-level magmatic systems**. London: The Geological Society, 2008. p. 31-44. (Special Publications, 302).
- TRENDALL, A. F. Discussion and reply the Tennant Creek porphyry revisited: a synsedimentary sill with periperite margins, Early Proterozoic, northern territory. **Australian Journal of Earth Sciences**, Victoria, v. 41, n. 4, p. 391-392, 1994.
- WANDERLEY FILHO, J. Q.; TRAVASSOS, W. A. S.; ALVES, D. B. O diabásio nas bacias paleozoicas amazônicas: herói ou vilão? **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 177-184, nov. 2005/maio 2006.
- ZALÁN, P. V.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; WOLF, S.; ASTOLFI, M. A. M.; APPI, V. T.; WOLFF, S.; VIEIRA, I. S.; MARQUES, A. Estilos estruturais relacionados a intrusões magmáticas básicas em rochas sedimentares. **Boletim Técnico da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, p. 221-230, dez. 1985.

## expanded abstract

Basic, intrusive rocks in sedimentary successions are a common feature in Brazilian Paleozoic basins, and the study and description of their geometry and pattern of occurrence are important issues in the identification of potential traps, and in gas and oil exploration in those basins.

The intra-cratonic Parnaíba Basin in northeastern Brazil preserves a long and varied depositional history, ranging in age from the Cambrian (pre-Silurian rifts) to the Upper Cretaceous. The Parnaíba Basin experienced two great magmatic events during its long-term evolution: (i) the Camp (Central Atlantic Magmatic Province) event near the Triassic-Jurassic boundary (mainly sills and basalt flows ca. 200 Ma, locally known as the Mosquito Formation), and (ii) a more recent Early Cretaceous event (ca. 132 Ma) with diabase sills and dikes grouped together in the Sardinha Formation.

The wide variety of models and data currently available in literature suggest a complex relationship between the magma and the host rocks. Various parameters (density and magma injection pressure, steam generation, regional and local stress fields, overburden pressure, rheology of the host rocks, mechanical discontinuities, etc.) control the emplacement, expansion and final geometry of the igneous bodies in the sedimentary column.

The final geometry of the sills and their feeder dykes and/or pipes is a complex inter-play among the various parameters mentioned above. The main challenge to correctly describe the geometry of such structures is to identify the factors/mechanisms that control the intrusion and the expansion of the igneous bodies within the sedimentary section.

In recent years, petroleum exploration in the Parnaíba Basin has led to the acquisition of new, high quality seismic data and a general review of previous drilling data, permitting the identification of a number of distinct geometries associated with both magmatic events.

Igneous intrusions are readily identified in drillhole data due to their conspicuous signature in electric logs. Gamma Ray profiles are commonly used to identify sills within sedimentary rocks. Generally, sills are characterized by an increase in the Gamma Ray curve (GR) in the upper third of the intrusion, a pattern informally described as

*barriguda* (“paunchy”). In addition to this behavior in the GR profile, another important feature of the sills is the preservation of the original thickness of the sedimentary package, as the accommodation of these bodies is due to the uplift of the overlying section, with no or insignificant loss of the sedimentary section.

Most sills are intruded parallel to bedding, generally between thick shale packages along the interface between the Longá-Poti, Pimenteiras-Cabeças and Tianguá-Jaicós Formations, suggesting that greater shale contents favor the way for intrusion. The Upper Devonian Pimenteiras Formation contains the largest volume of intrusive basic rocks.

The western portion of the basin concentrates the majority of the basalt flows of the Mosquito Formation (ca. 200 Ma; Camp Event). Coincidentally, in this portion of the basin there are less diabase sills. On the other hand, the central portion of the Parnaíba Basin is characterized by the complete absence of basalt flows, as diabase sills easily reach individual thicknesses of 100-200m; in some cases, intrusions may reach an accumulated thickness greater than 500m.

Seismic data and surface features show that brittle shear zones are coincident with the occurrence of subvertical dykes (NW-SE and SW-NE), and played a key role in the emplacement of these magmatic bodies. In this context, the Picos-Santa Inês Lineament stands as a possible feeder zone for the sills of the Mosquito Formation. In seismic sections, the sills occur with a number of distinct geometries, including “layer parallel”, “saucer-shaped”, “planar transgressive” and “fault block” sill facies. By far, the most common pattern of intrusion is the “layer parallel” type; when intruded in this pattern, the sills may extend to hundreds of kilometers, and range in thickness from 2-5 meters to 250-300m. Also frequent are the saucer-shaped intrusions, which show a flat bottom and inclined, curved edges, and may extend from tens of meters to kilometers.

The association between magmatic intrusions and gas reservoirs has been pointed out as a priority target in the exploration of the Brazilian Paleozoic basins. The trapping model based on diabase sills has been tested with success by many oil companies and has recently been consolidated by new discoveries, particularly in the Parnaíba Basin. The main exploratory goal is based on the formation of structural highs capped by inclined

*or “jumping” sills, which can act as an effective seal to underlying reservoirs. Magmatic intrusions played an important role in the Petroleum System of the Parnaíba Basin, as their influence is believed to have increased the heating necessary for gas generation; controlled the formation of effective migration paths; and created traps able to form commercial accumulations.*

## autores



**Ivo Trosdtorf Junior**

E&P Exploração  
Ativos Exploratórios Mar  
Ativos Outros Países

[trosdtorf@petrobras.com.br](mailto:trosdtorf@petrobras.com.br)

**Ivo Trosdtorf Junior** possui graduação em Geologia (1999) e mestrado em Geologia Sedimentar (2002), ambos pela Universidade de São Paulo (USP). Ingressou na Petrobras em 2003 e, após curso de formação, foi designado para a gerência de interpretação das bacias da margem equatorial brasileira, trabalhando principalmente nas bacias do Pará-Maranhão e Barreirinhas. Desenvolveu trabalhos como intérprete e consultor nas bacias terrestres brasileiras, com destaque para as bacias de São Francisco, Parnaíba e Parecis-Alto Xingu. Atualmente trabalha como intérprete na Bacia do Golfo do México e consultor em projetos exploratórios da área internacional.



**Saulo Ferreira Santos**

E&P Exploração  
Ativos Exploratórios Terra  
Ativos Outros Países

[saulofs@petrobras.com.br](mailto:saulofs@petrobras.com.br)

**Saulo Ferreira Santos** é geólogo formado em 1984 na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Ingressou na Petrobras em 1985 e atuou nas bacias Potiguar (acompanhamento e avaliação de formações) e Sergipe-Alagoas (interpretação exploratória da porção marítima) até 1996. cursou mestrado em estratigrafia na UFRGS entre 1996 e 1998 e atuou no suporte técnico de estratigrafia e sedimentologia para a área de exploração até 2010. Desde então, atua como intérprete e consultor na exploração de bacias terrestres e como instrutor de cursos de sedimentologia e estratigrafia nas bacias do Paraná, Neuquén, Parnaíba e Itajaí. Atualmente trabalha na gerência de Ativos Outros Países como geólogo intérprete nas bacias do subandino.



**João Marinho de Moraes Neto**

E&P Exploração  
Ativos Exploratórios Terra  
Ativos Outros Países

[jmarinho@petrobras.com.br](mailto:jmarinho@petrobras.com.br)

**João Marinho de Moraes Neto** graduou-se em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) em 1987 e ingressou no mesmo ano na Petrobras. Tem experiência na área de geofísica de exploração, tendo trabalhado em projetos exploratórios e de integração regional nas bacias de Barreirinhas, Potiguar e Ceará. Possui mestrado em Geologia Estrutural e Tectônica na Universidade Federal de Ouro Preto (Ufop) (1999) e doutorado em Geologia na Universidade de Queensland, Austrália, integrando métodos termocronológicos com ênfase na história de resfriamento paleozoico/mesozoico, evolução geomorfológica e denudação da Província Borborema. Atuou na retomada da exploração nas bacias interiores como intérprete e consultor em projetos nas bacias do Parnaíba, São Francisco e Parecis-Alto Xingu. Atualmente está envolvido em projetos exploratórios nas bacias do subandino.



**Carlos Vieira Portela Filho**

E&P Exploração  
Ativos Exploratórios Terra Ativos Brasil

[cportela@petrobras.com.br](mailto:cportela@petrobras.com.br)

**Carlos Vieira Portela Filho** é geólogo graduado pela Universidade Federal do Paraná (2000) com mestrado em Geologia Exploratória (2003). Tem experiência acadêmica nas áreas de geofísica e hidrogeologia para a prospecção de águas. Atuou em empresa privada com mapeamento geológico para exploração mineral e como responsável técnico junto ao CREA-PR. Ingressou na Petrobras em 2002 e, após curso de formação, foi designado para a gerência de aquisição de dados sísmicos, onde desenvolveu atividades até 2010 no controle de qualidade, planejamento e contratação de aquisições terrestres. Trabalha como intérprete na Bacia do Parnaíba.