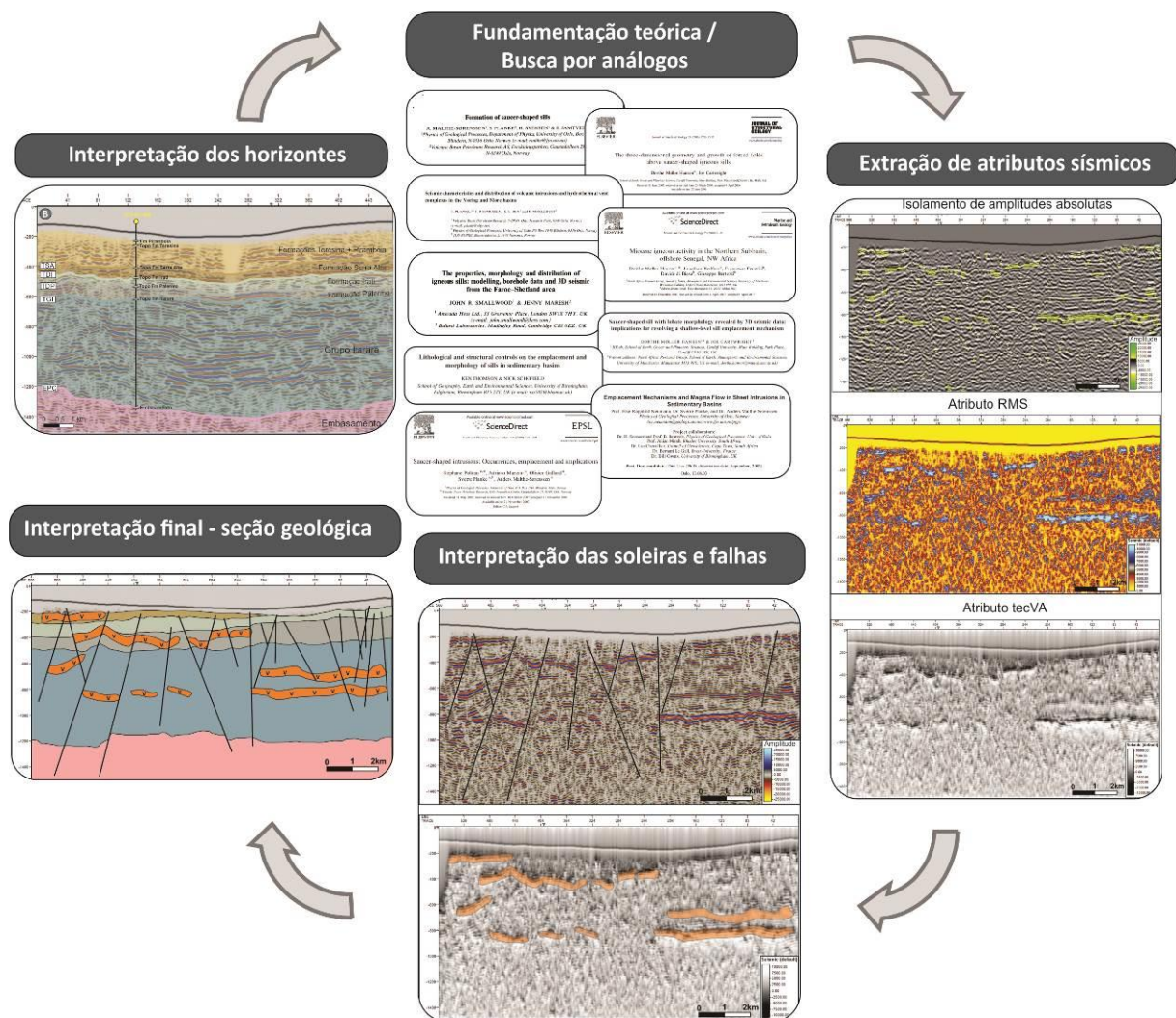


## 4.5 Interpretação de intrusivas e estruturas

### 4.5.1 Fluxograma de interpretação

O trabalho de interpretação das falhas, soleiras e diques seguiu um fluxo de trabalho detalhado na Figura 41.

Figura 41 – Fluxograma de trabalho para interpretação do arcabouço estrutural



Nota: O fluxo de trabalho contempla ainda diques e soleiras de Diabásio.  
Fonte: O autor, 2015.

Concomitante a interpretação dos horizontes, deu-se as primeiras observações acerca das estruturas e intrusivas que compõe o arcabouço estrutural das linhas disponíveis. Nesse momento, verificou-se que parte das falhas e o padrão de arqueamento dos refletores

sísmicos/camadas/horizontes mapeados, poderiam estar associados às soleiras e diques de diabásio, de modo que se fez necessário uma pesquisa específica sobre mecanismos de intrusão/deformação e geometria de soleiras na tentativa de correlação e busca por análogos.

Com um embasamento teórico consideravelmente solidificado, foram extraídos atributos sísmicos que permitissem melhor visualização e mapeamento das soleiras/diques e estruturas, como: o isolamento dos valores máximos e mínimos de amplitude através da manipulação de escala de cores; atributo de RMS (*root mean square*) e o atributo de tecVA (Figura 42).

O isolamento das amplitudes absolutas, tanto máxima (10000 a 25000) quanto mínima (-10000 a -25000), enfatizou através das cores verde e amarelo sobre uma escala de cinza para as amplitudes baixas a médias (0 a  $\pm 7500$ ), os grandes contrastes de impedância possivelmente associados a corpos ígneos encaixadas em sedimentos (Figura 42.B).

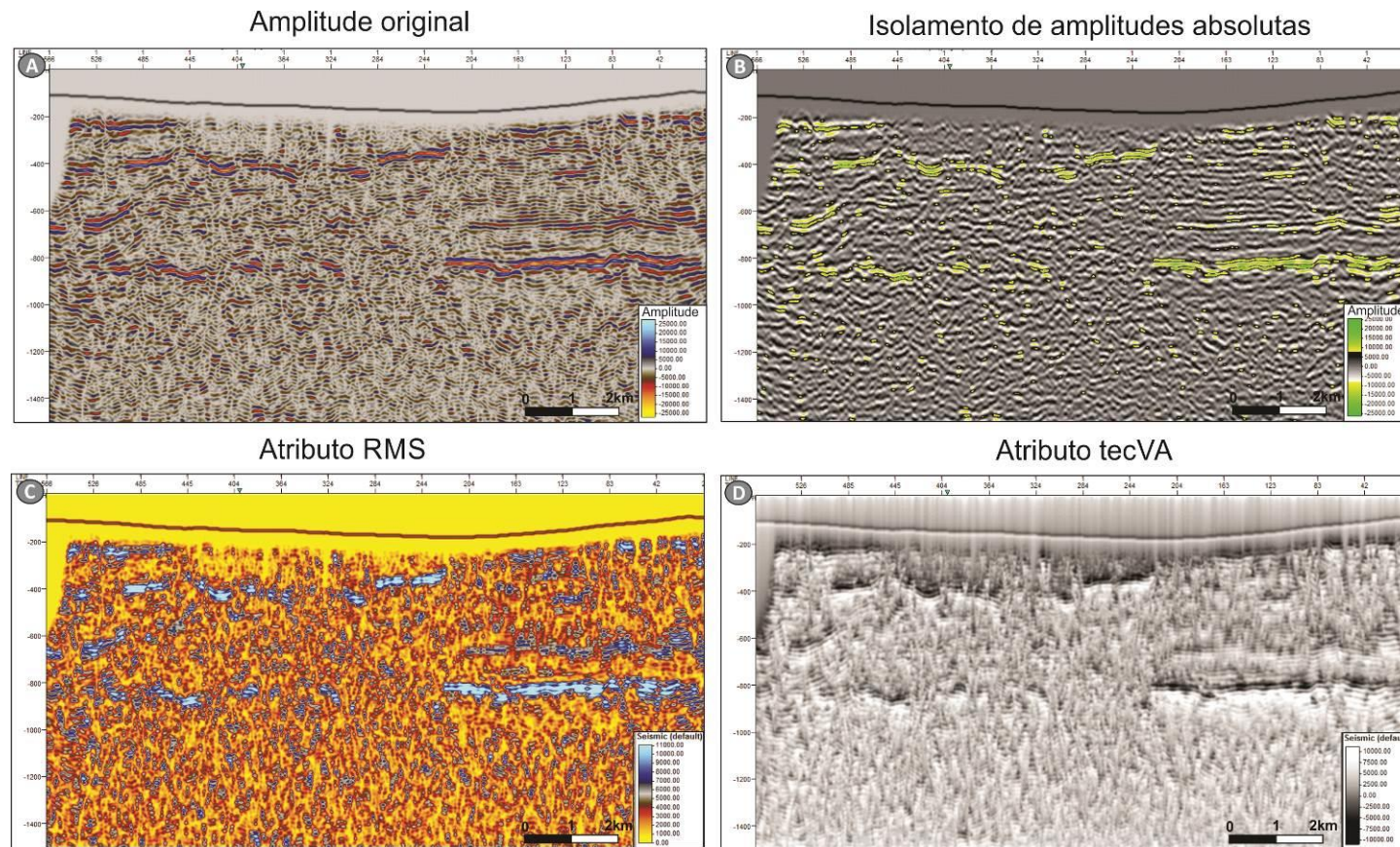
Mesmo com essa abordagem, a qualidade da sísmica mostrou muitos pontos coloridos ligados a ruídos, de onde se fez necessário a extração dos atributos de RMS e posteriormente o tecVA na tentativa de isolar apenas anomalias de amplitude com representatividade geológica.

O atributo de RMS mede a refletividade ao longo de uma janela de tempo usando a raiz quadrada da soma das amplitudes ao quadrado dividido pelo número de amostras, como resultado, as máximas amplitudes (tons de azul) são enfatizadas em relação às mínimas amplitudes (tons em vermelho e amarelo) (Figura 42.C).

O RMS serve como atributo de entrada para o uso da técnica Volume de Amplitude ou tecVA - inicialmente utilizada para o ressaltado de camadas e variação faciológica – que consiste em ressaltar altos contrastes de impedância empiricamente através da rotação de fase de 0 para -90°. Como resultado, o (folhelho) é considerado como fundo (background) e areias, conglomerados, vulcânicas, intrusivas, folhelhos geradores, carbonatos, etc. como altos contrastes de amplitude sendo as camadas enfatizadas (Bulhões, 2005).

Aplicando esse atributo ao dado em que os principais contrastes de amplitude são dados pela presença das intrusivas, o tecVA mostrou-se essencial para a identificação das soleiras e padronização de suas geometrias, relação com as camadas encaixantes e a associação com outras estruturas, bem como a possível identificação de diques alimentadores (Figura 42.D).

Figura 42 – Exemplo dos atributos extraídos para a interpretação das soleiras, diques e estruturas



Nota: Em (A) a amplitude original da sísmica. Em (B), amplitude original com manipulação da escala de cores a fim de enfatizar as amplitudes absolutas máximas e mínimas. Em (C), atributo de RMS. Em (D), técnica Volume de Amplitude ressaltando as soleiras em detrimento dos pacotes sedimentares.

Fonte: O autor, 2015.

#### 4.5.2 Fundamentação teórica

A partir da premissa de que o transporte e a implementação de magmas na crosta terrestre representam processos geológicos fundamentais, Neumann *et al.* (2003) enfatiza ainda, que o entendimento desses processos tem importantes implicações na dinâmica evolutiva de uma bacia vulcano-sedimentar, tais quais: a exploração de depósitos minerais associados a corpos intrusivos; implicações no sistema petrolífero e na exploração de hidrocarbonetos e de águas subterrâneas.

No que tange as implicações no sistema petrolífero, Neumann *et al.* (2003) as separam em dois momentos do processo de implementação de corpos intrusivos: durante a intrusão e após a intrusão. O Quadro 9 exprime essa relação implicadora das intrusivas com os processos e elementos do sistema petrolífero.

Quadro 9 – Quadro resumo para as implicações de intrusões ígneas em um sistema petrolífero

Durante a intrusão		Após a intrusão	
Implicação	Consequência	Implicação	Consequência
Maturação	Possibilita ou potencializa a geração de HC na auréola térmica da intrusiva.	Migração	Reaproveitamento de sistemas de fraturas. Barreiras e compartimentação.
Migração	Provoca uma circulação hidrotermal e gera caminhos de migração.	Formação de Trapas	Compactação diferencial
Formação de Trapas	Soerguimento e deformação do pacote sedimentar de sobrecarga possivelmente formando trapas.	Selos	Tufos vulcânicos alterados

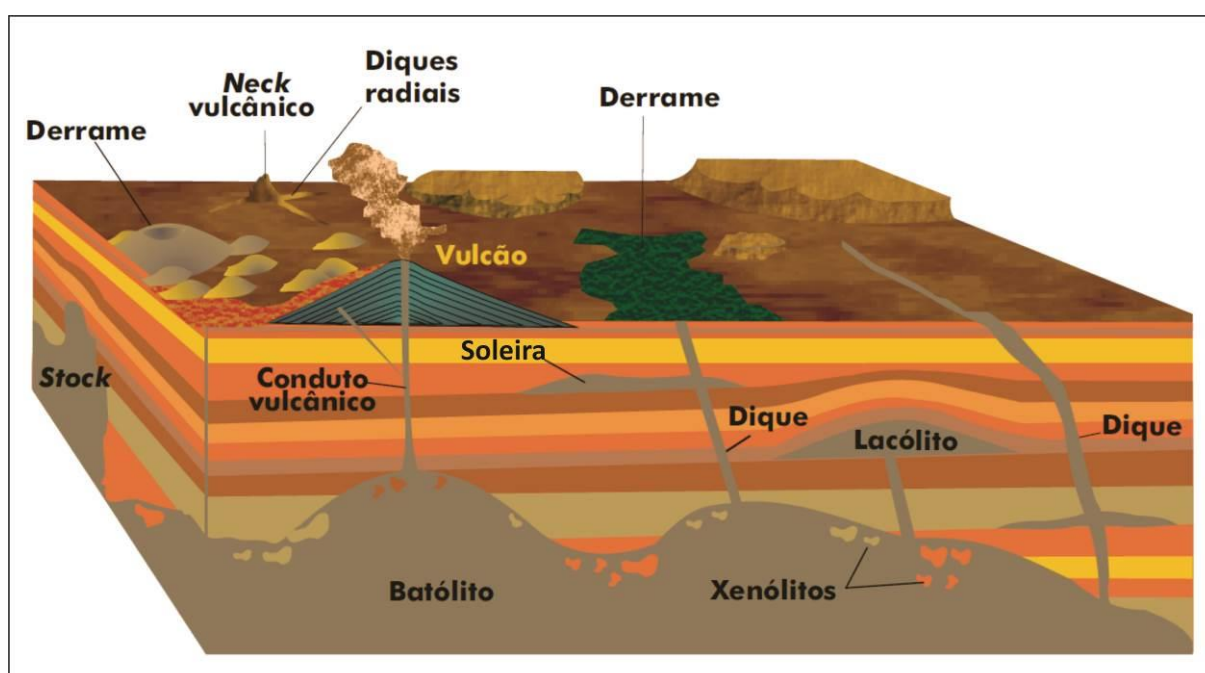
Fonte: Neumann *et al.*, 2003.

O Magmatismo Serra Geral – como já abordado no capítulo 2 – afetou e atuou profundamente nos eventos e elementos que possibilitaram as acumulações de hidrocarbonetos na Bacia de Paraná. Dentre as formas em que esse magmatismo se manifestou, **diques** e **soleiras** de diabásio foram reconhecidos na interpretação sísmica, portanto, algumas definições tanto geológicas quanto do sinal sísmico são necessárias.

As chamadas intrusões tabulares ou em lençol (sheet intrusions), como diques, soleiras e lacólitos são as formas mais comuns e rápidas de transporte de magma na crosta terrestre (Rubin, 1995 apud Malthe-Sørenssen *et al.* 2004). Diques são preenchimentos verticais a sub-

verticais de magmas ao longo de fraturas, controlados principalmente pelas propriedades de fluabilidade do magma sob altas temperaturas. Em adendo, diques predominantemente truncam/cortam as camadas geológicas (Neumann *et al.* 2003). Já as soleiras, também de caráter tabular, são predominantemente paralelas ao acamamento da rocha hospedeira, podendo haver segmentos transgressivos discordantes a estratificação. Lacólitos por sua vez, embora também paralelos às camadas da hospedeira, distinguem-se das soleiras pela geometria em que a sua base é reta e o topo na forma de domo (Malthe-Sørenssen *et al.* 2004). (Figura 43).

Figura 43 – Diagrama esquemático mostrando as formas de ocorrências de rochas magmáticas



Nota: As formas tabulares em soleira e dique foram identificadas nas linhas 2D.  
Fonte: O autor, 2015.

No que diz respeito ao imageamento sísmico de corpos intrusivos, soleiras possuem uma alta velocidade sísmica ( $V_p \sim 5-7$  km/s), e são comumente imageadas como reflexões de alta amplitude quando intrudidas em pacotes sedimentares (Neumann *et al.* 2003). Diques ainda representam pontos cegos ou *pitfalls* na sísmica como a maioria dos corpos/estratos verticalizados, notadamente por uma razão física na propagação das ondas acústicas que com o ângulo ou não, imageiam melhor estratos horizontais a sub-horizontais. De todo modo, o condicionante de ocorrerem preenchendo fraturas, e pela sua relação como alimentadores de soleiras, permitiu que discontinuidades verticais mapeadas como falhas pudessem ser associadas a diques. Aqui ainda, houve a tentativa de correlação entre diques aflorantes projetando-os para a subsuperfície em área que houvesse interceptação com uma linha 2D.

Diversos estudos na escala da sísmica e de campo constataram que a geometria fundamental de uma soleira é aquela em formato de pires (*saucer-shaped*) (Neumann *et al.* 2003), sendo esta e algumas de suas subclassificações reconhecidas nitidamente na interpretação sísmica deste trabalho.

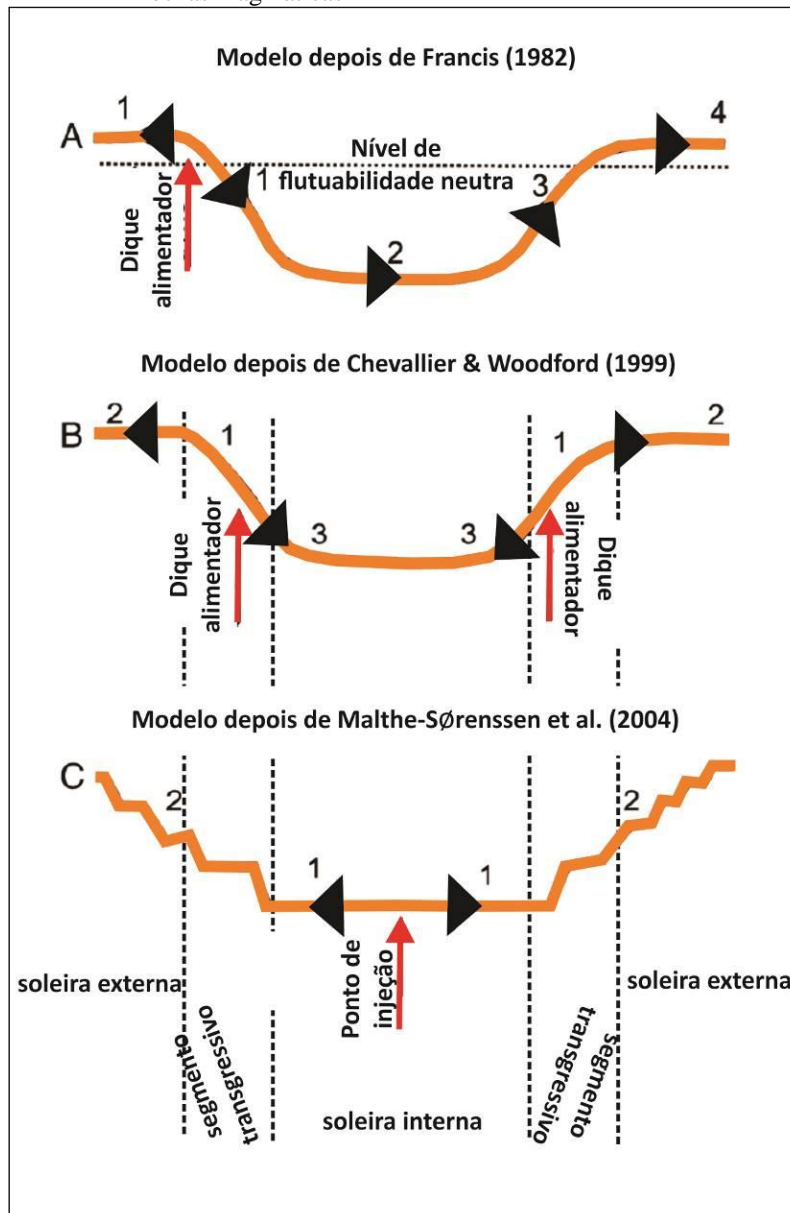
Desse modo, a seguir serão abordados e discutidos os principais aspectos geométricos de soleiras em formato de pires, bem como e os principais modelos relacionados aos mecanismos e posicionamento destas nos pacotes sedimentares, já que muitas estruturas com potencial implicador na dinâmica de um sistema petrolífero ocorrem associadas.

#### 4.5.3 Modelo de implantação de soleiras

Dentre os muitos parâmetros que contribuem e controlam a implementação de uma soleira, o trabalho de Neumann *et al.* (2003) compila vários autores e lista os seguintes fatores: a densidade do magma e a pressão aplicada em relação ao campo de tensões regional (Anderson, 1951); a espessura do pacote de sobrecarga (Mudge, 1968); a presença de sedimentos úmidos que interagem com o magma formando barreiras e produção de vapor (Mudge, 1968); descontinuidades mecânicas como o acamamento (Mudge, 1968; Gretener, 1969); contraste petrofísico entre diferentes unidades litológicas promovendo tensão horizontal entre os estratos (Gretener, 1969); a existência de fraturas (Leaman, 1975) ou falhas (Liss, 2001); e o nível de inversão de densidades entre o magma e a rocha hospedeira (Francis, 1982).

Os modelos de implantação de soleiras são geralmente baseados na análise da geometria da intrusão e sua relação espacial entre uma única soleira e seus potenciais diques alimentadores, onde três deles são bem difundidos na literatura e estão expressos na figura a seguir (Figura 44).

Figura 44 –Figura esquemática mostrando formas de ocorrência das rochas magmáticas



Nota: As formas tabulares em soleira e dique foram identificadas nas linhas 2D.

Fonte: Teixeira *et al.*, 2000. Figura 16.11, p. 339.

O modelo definido após Francis (1982) assume que diques alimentadores intrudem a região de ombreia de uma bacia acima do nível de flutuabilidade neutra (nível em que a pressão do magma é igual à pressão litostática), onde a densidade do magma iguala-se a densidade da rocha hospedeira, que impedem que o dique continue a ascender forçando-o a fluir no nível em que a densidade do magma seja maior que o de sedimento. Em consequência, o fluxo do magma é gravitacionalmente direcionado para baixo ao longo dos planos de acamamento da hospedeira em direção ao centro da bacia. Uma vez que o equilíbrio hidrostático precisa ser restabelecido, o magma pode fluir novamente para cima, ascendendo

ao flanco oposto da intrusão do dique alimentador, culminando com uma soleira em formato de pires.

Chevallier & Woodford (1999) com base na geometria de soleiras na Bacia de Karoo (África do Sul), sugerem em seu modelo que diques verticais alimentadores tornam-se inclinados à medida que ascendem até horizontalizarem formando a “soleira externa”. Em consequência, fraturas promovidas pelo soerguimento dos sedimentos na parte central do “anel de soleira” durante a intrusão, provocariam um fluxo descendente do magma para porções inferiores formando uma “soleira interna” e configurando o formato em pires.

Por sua vez, o modelo definido após Malthes-Sørensen *et al.* (2004) foi baseado experimentalmente e numericamente em simulações de injeção de um fluido de baixa viscosidade em um meio elástico, equivalentes respectivamente, a um magma e o sedimento encaixante, no nível de flutuabilidade neutra. Como resultado desta modelagem, os autores observaram que no momento da intrusão, o consequente soerguimento do pacote de sobrecarga promove uma anisotropia no campo de tensões inicialmente isotrópico nas extremidades da soleira, propiciando a formação de segmentos transgressivos a partir do momento em que o diâmetro da soleira interna excede em duas a três vezes a espessura dos pacotes sobrepostos, de modo a formatar o “pires”. Este modelo não leva em consideração diques alimentadores.

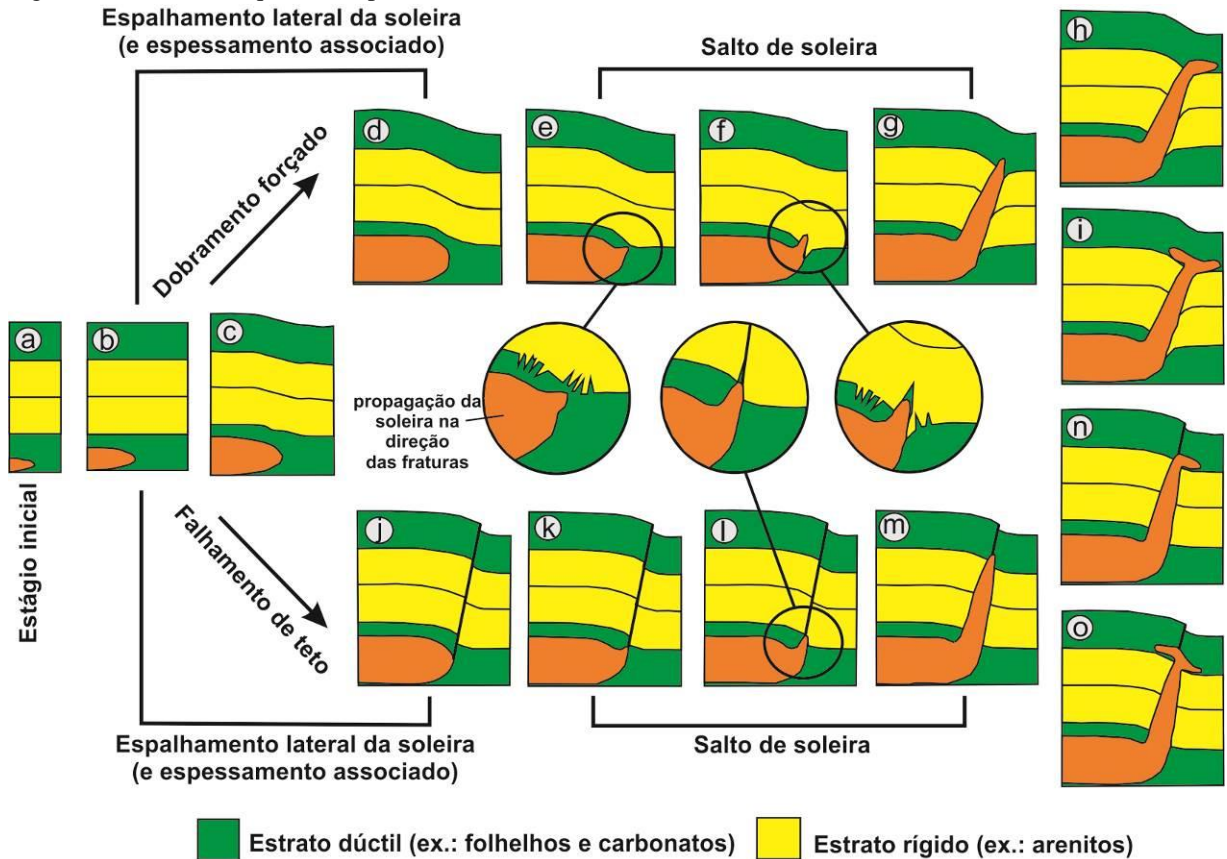
Em adição, baseado em observações de soleiras em formato de pires e/ou lacólitos na margem NW continental europeia, Thomson & Schofield (2008) sugerem que o nível de flutuabilidade neutra pode não ser o controlador determinante no fluxo ascendente ou descendente na formação de soleiras em formato de pires, já que estas podem ocorrer abaixo deste nível. Sob esta perspectiva, horizontes dúcteis como folhelhos e/ou carbonatos pressurizados poderiam forçar e iniciar o processo de horizontalização da soleira a partir de um dique alimentador até então vertical. No caso dos folhelhos, o contato inicial do dique com a camada ocasionaria a volatilização do(s) fluido(s) dos poros, aumentando drasticamente a pressão nos poros e reduzindo a efetividade da tensão exercida e facilitando a intrusão da soleira ao longo do estrato (Bjørlykke, 1993, apud Thomson & Schofield, 2008). Para os carbonatos, o contato inicial liberaria dióxido de carbono, promovendo o mesmo efeito de redução da tensão efetiva, viabilizando a fluidização e fraturamento e permitindo que o magma flua e se propague ao longo da camada (a, b e c da Figura 45).

O espalhamento lateral das soleiras para esse caso pode ocasionar dobramento forçado das camadas de sobrecarga, pois passa a comprimir e afinar a camada dúctil à medida que ocupa o espaço antes pressurizado (d), ou fraturar formando falhas de teto (j). Em ambos os



casos, ocorre em consequência um salto de soleira para níveis estratigráficos acima (e, f e g para o dobramento forçado, e k, l e m para o falhamento do teto). No caso de encontrar um novo estrato de natureza dúctil, a soleira se espalharia lateralmente outra vez formatando o pires ou servindo de alimentador para uma nova soleira ou lacólito (h e i para o dobramento forçado, e n e o para o falhamento do teto).

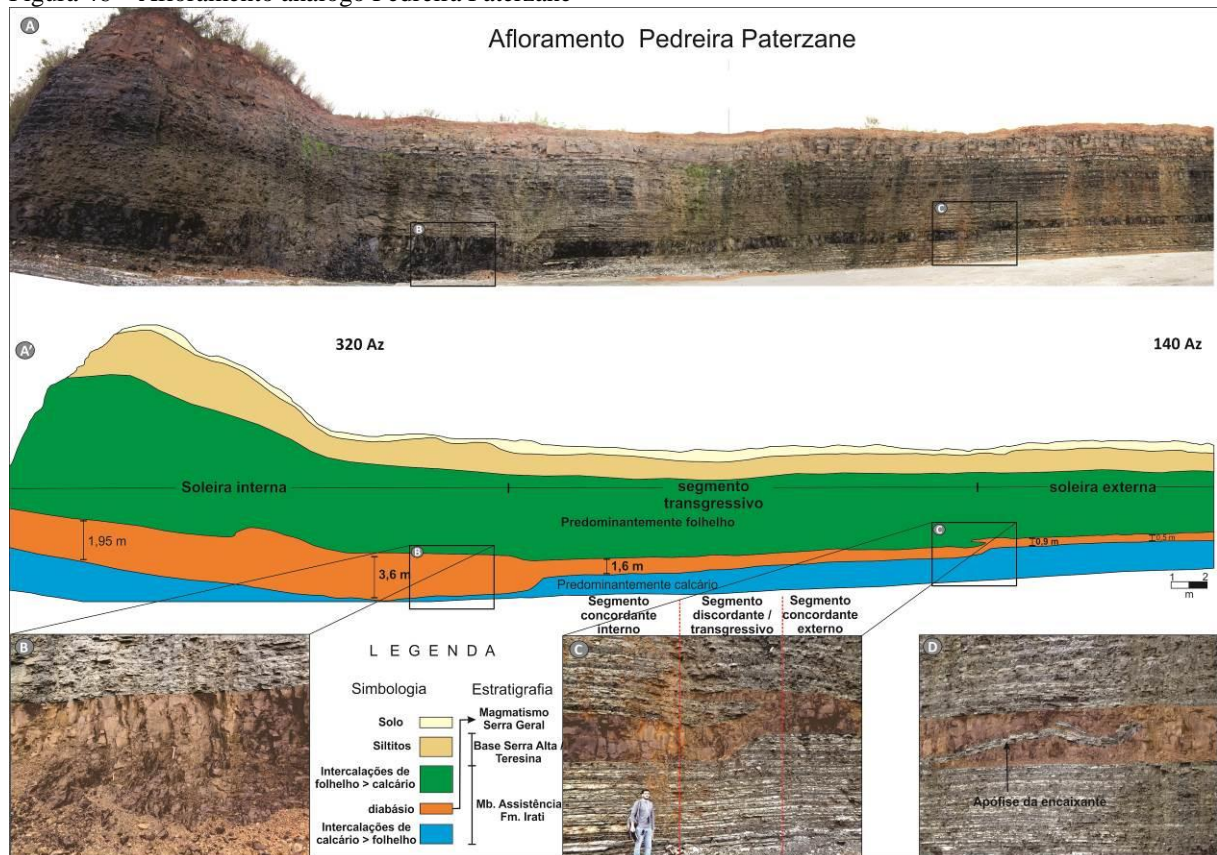
Figura 45 – Modelo esquemático para o desenvolvimento de intrusões de soleiras em bacias sedimentares



Fonte: Adaptado de Thompson, Schofield, 2008. Figura 8, p. 41.

Como exemplo e análogo foi observado em campo um exemplo mostrando a preferência por horizontes dúcteis durante a implantação. O Membro Assistência da Formação Irati é constituído por intercalações de folhelhos e carbonatos de onde pode ser observada parte da geometria de uma soleira em pires (Figura 46).

Figura 46 – Afloramento análogo Pedreira Paterzane



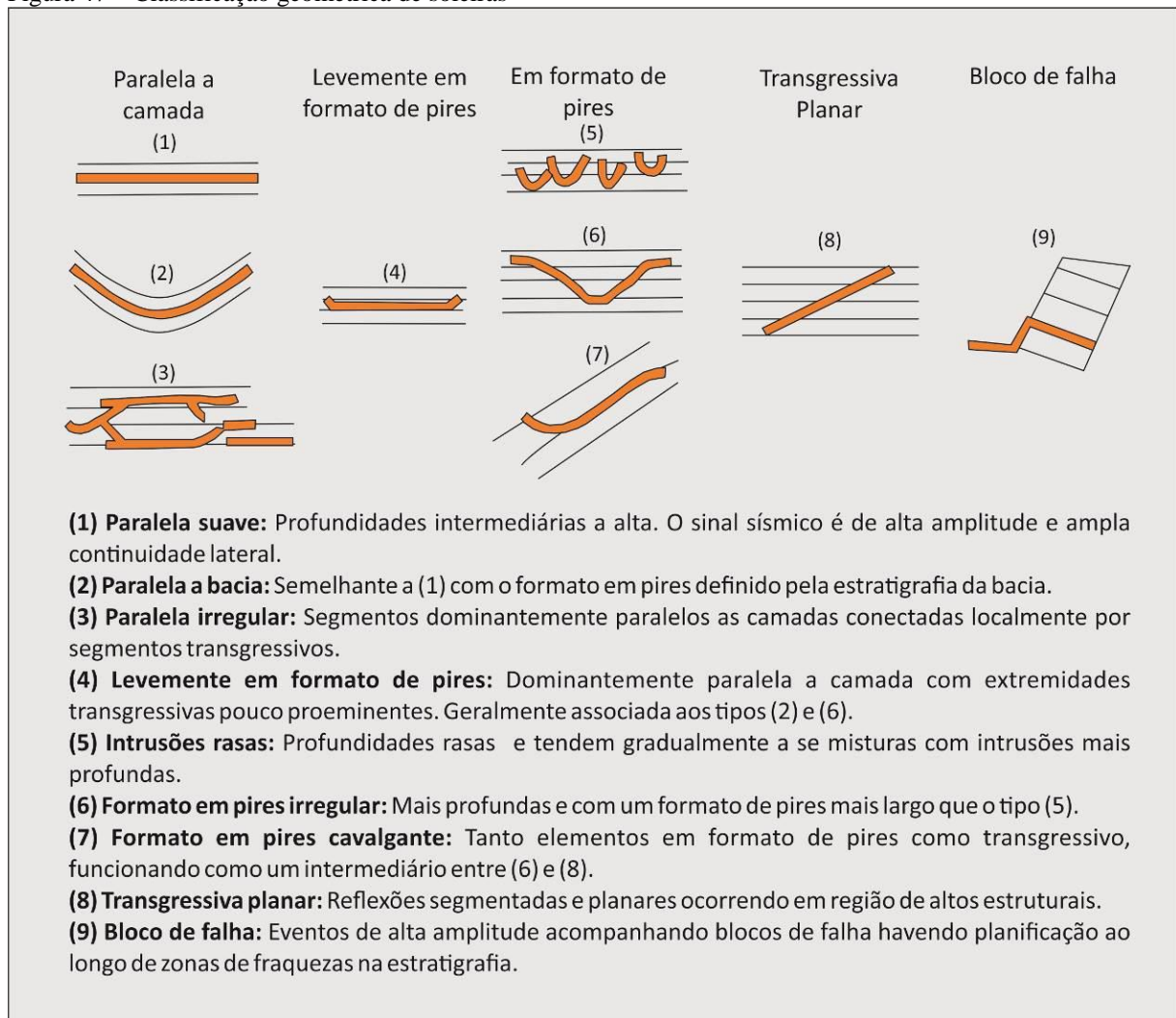
Nota: Foto mosaico (A) e esboço de campo (A') do afloramento Pedreira Paterzane, mostrando uma soleira em forma de pires intrudindo folhelhos e carbonatos do Membro Assistência da Formação Irati. Embora incompleta, é possível caracterizar geometricamente a soleira em interna, segmento transgressivo onde ocorre um salto de soleira e a soleira externa. Em (B), zoom de onde a soleira interna atinge maior espessura (3,6 m) e afina para direita quando salta para o segmento transgressivo (1,6 m); em (C) zoom do salto de soleira entre o segmento transgressivo e a soleira externa. Foi observada também apófise localizada da encaixante dentro da soleira (D).

Fonte: O autor, 2015.

#### 4.5.4 Geometrias de soleiras em formato de pires

O uso da sísmica 3D na interpretação de soleiras, permitiu a Planke *et al.*, 2005, em seu trabalho nas bacias de Vøring e Møre na Noruega, classificar 9 tipos de sismofácies para soleiras a depender da sua geometria, sua relação com os estratos da encaixante e a profundidade em que ocorrem. Agrupam-se em cinco grupos a depender desses aspectos – descritos na Figura 47 – podendo ser classificados em paralelos a camada/bacia (1, 2 e 3); levemente em formato de pires (4); em formato de pires (5, 6 e 7); fácies transgressiva planar (8) e por bloco de falha (9).

Figura 47 – Classificação geométrica de soleiras

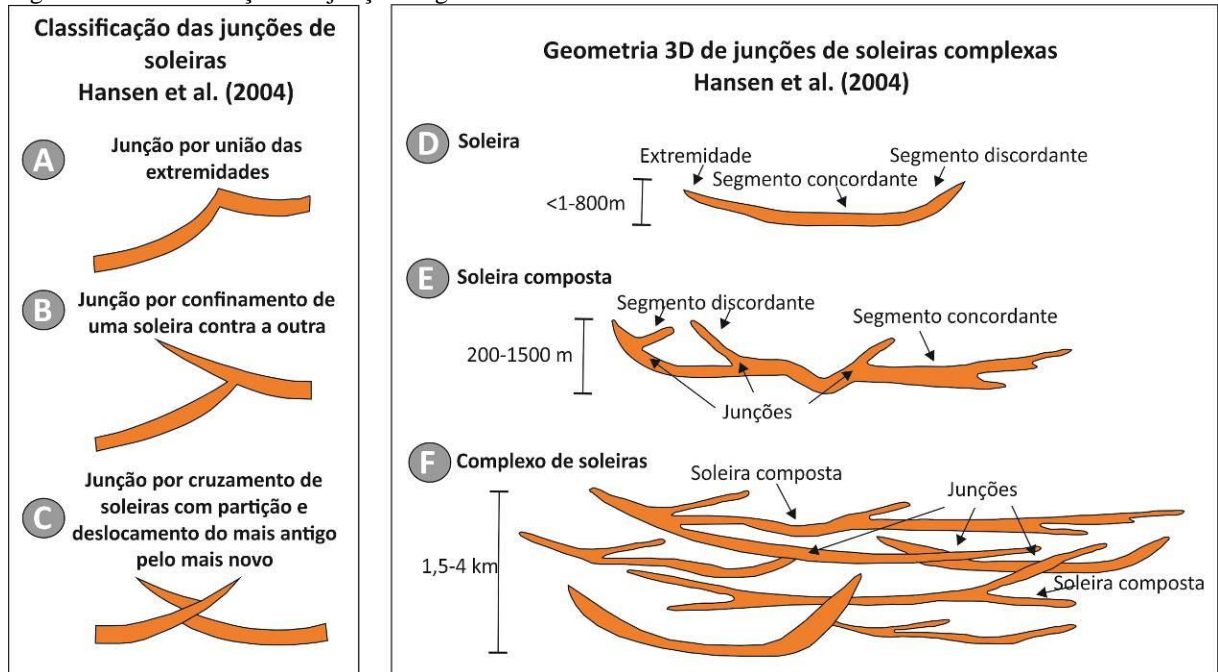


Nota: Essa classificação foi fomentada a partir da análise de sismofácies observadas nas bacias de Vøring e Møre na Noruega.

Fonte: Adaptado de Planke *et al.*, 2005.

Esta classificação de Planke *et al.*, 2005, leva em consideração soleiras individualizadas, de modo que Hansen *et al.*, 2004, classificaram os tipos de junção de duas ou mais soleiras, já que em bacias que se encaixam na classificação de província magmática como a Bacia do Paraná, é natural apresentar uma densa e emaranhada rede de intrusivas como soleiras compostas e até mesmo complexo de soleiras (Figura 48).

Figura 48 – Classificação das junções e geometria 3D de soleiras



Nota: Em (A), junção pela união das extremidades; Em (B), junção por confinamento de uma soleira contra a outra; Em (C), junção por cruzamento de soleiras com partição e deslocamento do mais antigo pelo mais novo; Em (D), soleira em formato de pires com espessura variando de <math><1</math> a 800 m; Em (E), soleira composta apresentando junções entre duas ou mais soleiras com espessuras variando de 200 a 1500 m; e em (F), complexo de soleiras apresentando junções de duas ou mais soleiras compostas com espessuras variando de 1,5 a 4 km.

Fonte: Adaptado de Hansen *et al.*, 2004. Figuras 8 e 3, p. 204 e 201, respectivamente.

Soleiras em formato de pires geralmente possuem um diâmetro <math><10</math> km, cobrindo áreas com pouco menos de dezenas de km<sup>2</sup>, e exibem um relevo vertical de 500-800 m, entretanto, ocasionalmente, podem chegar a 1500 m (Hansen *et al.*, 2004).

#### 4.5.5 Estruturas associadas à intrusão de soleiras e diques

Algumas estruturas ocorrem associadas à intrusão de soleiras e diques estabelecendo assim uma relação genética de causa e efeito entre elas.

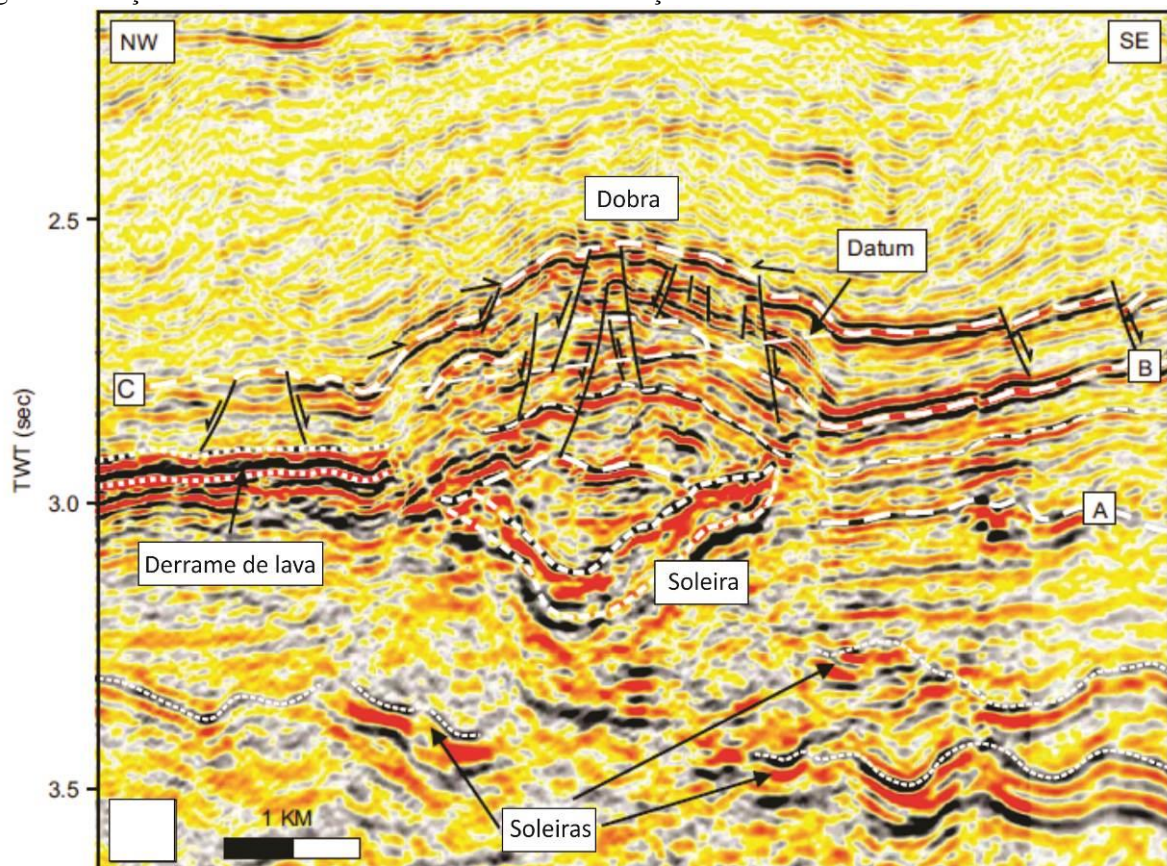
Polteau *et al.* (2007) ressaltam que é comum ocorrer o domeamento das camadas logo acima e associadas a soleiras em formato de pires (Figura 49). Hansen & Cartwright (2006) aplicam ainda o conceito de dobramento forçado de Stearns (1978) - dobras forçadas são aquelas em que sua forma e tendência estrutural são dominadas pela forma e força de algum membro abaixo – associando o dobramento forçado das camadas pelas soleiras formando um

anticlinal, sendo potenciais trapas exploratórias de hidrocarboneto na categoria de um fechamento em quatro direções (*four-way dip closure*).

Além da possibilidade de trapa exploratória, o fraturamento associado a dobras forçadas têm, segundo Cosgrove & Ameen (2000), importantes implicações no fluxo de fluidos de uma bacia e na migração de hidrocarbonetos de um sistema petrolífero nela compreendido.

O trabalho de Hansen & Cartwright (2006) a partir da análise de dados sísmicos 3D da Bacia de Rockall (margem NE do Atlântico), propôs um modelo de crescimento de dobras forçadas relacionadas à intrusão rasa de soleiras em formato de pires e suas implicações, de modo a estabelecer uma relação entre a espessura da soleira abaixo das camadas dobradas e a potência do dobramento forçado das camadas (Figura 49).

Figura 49 – Seção sísmica na Bacia de Rockall ilustrando a relação soleira-dobra



Nota: Na interpretação é possível observar que os horizontes B e C estão dobrados logo acima da soleira (indicados na figura). A soleira em questão mede 3 km por 2,5 km, cobrindo uma área aproximada de 7,4 km<sup>2</sup> e um relevo vertical de aproximadamente 300 m. É notável também, que os refletores entre a soleira e os horizontes A e B estão bastante falhados.

Fonte: Adaptado de Hansen, Cartwright, 2006. Figura 4, p. 1525.

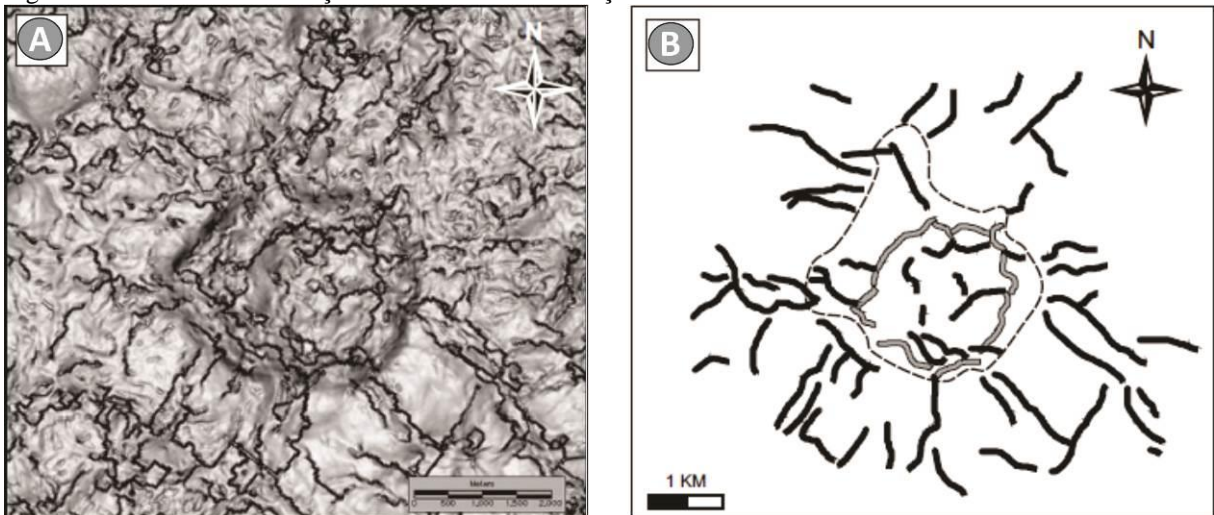
O mapeamento das dobras forçadas e das soleiras no estudo de Hansen & Cartwright (op. cit.), demonstra que a espessura do relevo estrutural das camadas arqueadas guarda uma

proporção com a espessura do relevo vertical das soleiras logo abaixo, sendo maior logo acima da parte central (soleira interna) e tende a diminuir nos flancos acompanhando os segmentos transgressivos e soleiras externas, já que o relevo vertical e espessura da soleira também diminuem.

O estudo também faz referência ao aumento da densidade e intensidade das falhas que afetam as camadas logo acima das soleiras em relação às áreas adjacentes onde não há soleiras nem dobramentos forçados. Estas falhas são de característica extensional, predominantemente planares a gentilmente lítricas, podendo apresentar rejeitos de até 100 m de deslocamento (vide figura 49). As falhas mais altas também guardam relação com a parte central da soleira (soleira interna), de onde diminuem de frequência à medida que se aproximam do segmento transgressivo sendo substituídas por falhas mais curtas e de menor rejeito.

As falhas se comportam de forma concêntrica a geometria da soleira em formato de pires sotoposta, mergulhando do centro em direção as bordas. À medida que avançam para o perímetro externo da soleira, as falhas adquirem um padrão radial e ortogonal às falhas concêntricas. Além desse ponto, tornam-se poligonais possivelmente em reposta a interferência do campo de tensões ligado ao crescimento das camadas na área do domo dada pela compactação diferencial (Figura 50).

Figura 50 – Perímetro de atuação de um dobramento forçado



Nota: Atributo de time-dip (A) mostrando em mapa o perímetro de atuação de uma dobra forçada acima de uma soleira em formato de pires e as falhas mapeadas (B). Os traços descontínuos marcam o contorno da soleira, as falhas cinzas, o padrão concêntrico e as pretas, o padrão radial e poligonal.

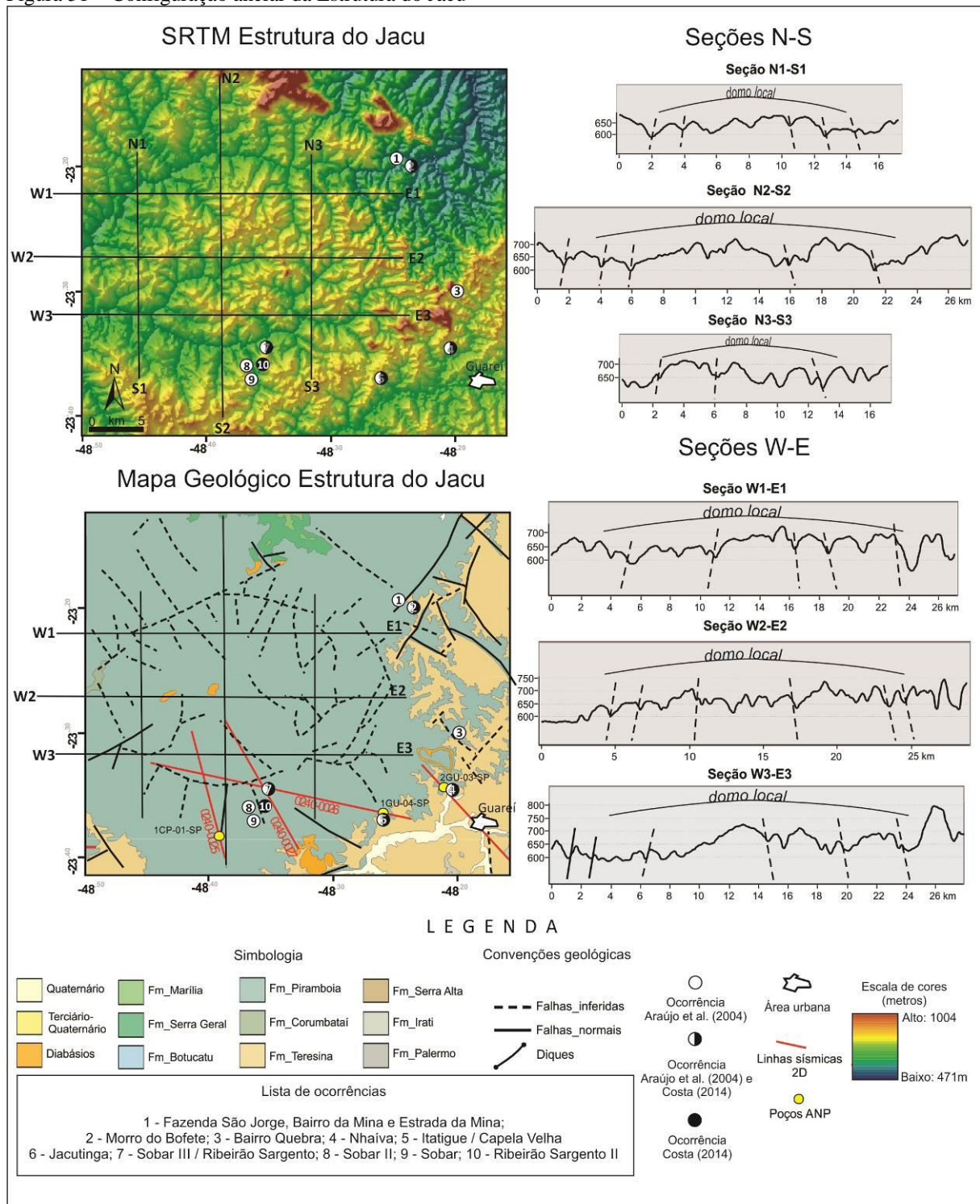
Fonte: Adaptado de Hansen & Cartwright, 2006. Figura 10, p 1530.

Como se trata de uma interpretação sísmica de baixa densidade de linhas 2D, a observação desse padrão em 3D não é possível em subsuperfície. Entretanto, é apelativo

chamar a atenção para o padrão anelar de estruturas no mapa geológico e SRTM/MDE, como a Estrutura do Jacu.

A Estrutura do Jacu é caracterizada de forma descritiva como um padrão de drenagem anelar e é possível observar lineamentos rúpteis ortogonais a este padrão, que pelo mapeamento da CPRM estão formatados como falhas normais e inferidas (Figura 51). Tais padrões podem ser indicadores de que a gênese deste domeamento local pode estar associada a dobramentos forçados causados pela intrusão de soleiras em formato de pires, de onde, inclusive, é possível observar afloramentos mapeados de diabásio em alguns pontos da estrutura, corroborando com a presença de intrusivas na região da estrutura.

Figura 51 – Configuração anelar da Estrutura do Jacu



Nota: Imagem SRTM com sombreamento do relevo e Mapa Geológico da Estrutura do Jacu, mostrando a sua configuração anelar com padrão de lineamentos/falhas radiais e ortogonais a circunferência que da forma a estrutura. As seções orientadas são perfis topográficos extraídos da imagem SRTM (escala vertical em m e escala horizontal em km), mostrando que a Estrutura do Jacu é um domo local com uma alta densidade de falhas. Notar como a configuração da Estrutura do Jacu assemelha-se a soleira interpretada por Hansen, Cartwright, 2006, no atributo de time-dip mostrado na Figura 49.

Fonte: O autor, 2015.

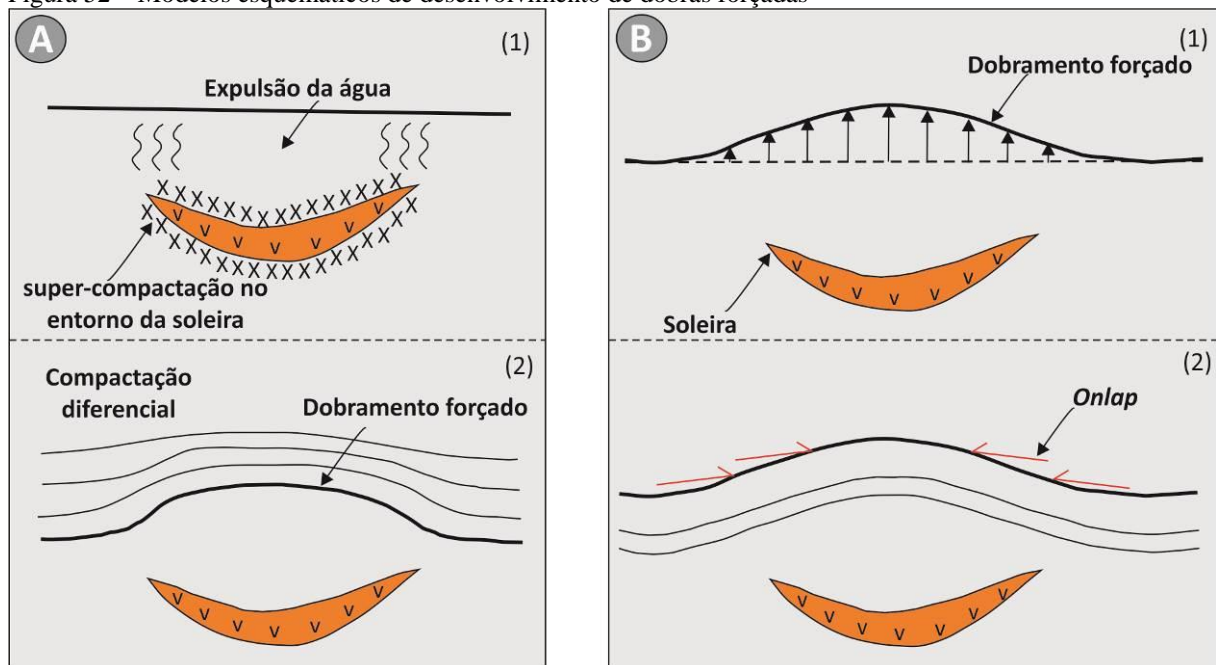
Infelizmente nenhuma das linhas 2D disponíveis ou requeridas testou a Estrutura do Jacu em seções representativas, apenas parte da borda sul, de onde através da interpretação



foram observadas várias soleiras em subsuperfície, enfatizando a possível relação soleira-domeamento forçado.

Uma possível interpretação para a relação soleira-dobra seria a formação da mesma ser resultado da compactação diferencial acima da soleira em formato de pires em associação a expulsão de fluidos pela rocha hospedeira durante a intrusão (Einsele *et al.*, 1980). Entretanto, Hansen & Cartwright (2006), sugerem que o dobramento forçado nesse contexto estaria necessariamente associado a uma geometria divergente dos estratos. Desse modo, propõe-se que estas estruturas desenvolvem-se devido ao deslocamento vertical acima das soleiras em formato de pires durante a sua intrusão (Figura 52).

Figura 52 – Modelos esquemáticos de desenvolvimento de dobras forçadas



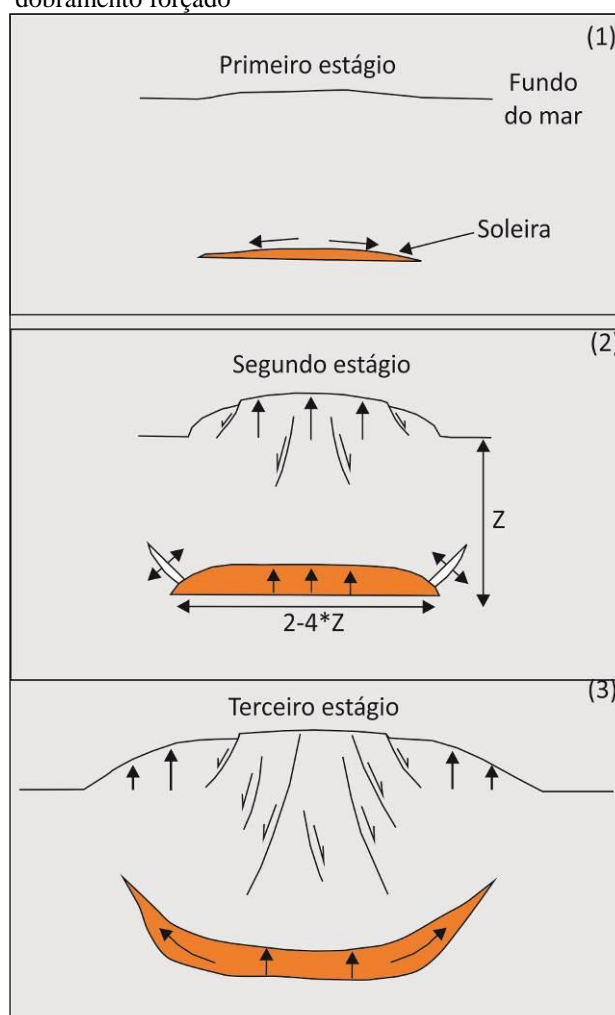
Nota: Ilustração esquemática para dois modelos de desenvolvimento de dobras forçadas pela intrusão de soleiras em formato de pires. Em A por compactação diferencial e em B, deslocamento vertical dos estratos de sobrecarga. Os dois modelos foram reconhecidos sismicamente por Hansen & Cartwright (2006) em seu trabalho na Bacia de Rockall.

Fonte: Adaptado de Hansen, Cartwright, 2006. Figura 12, p. 1532.

A partir dos modelos de Pollard & Johnson (1973) e comparando os modelos de Fialko (2001) e Malthe-Sørensen *et al.* (2004), Hansen & Cartwright (op. cit.) enfatizam que o crescimento de dobras forçadas acima de soleiras em formato de pires esta diretamente ligado ao mecanismo de implementação do corpo intrusivo, sendo portanto um processo contínuo. Para tanto, elaboraram um modelo simplista de cinemática com três estágios para o crescimento de dobras forçadas. No estágio inicial (Figura 53.1), a deformação é limitada pela interface sedimento-água acima da soleira ainda pouco espessa e embrionária. Após espalhar-se por cerca de aproximadamente duas vezes a profundidade da intrusão, a espessura da

soleira começa a aumentar a taxas mais rápidas no segundo estágio (53.2). Neste episódio, uma dobra forçada com relevo estrutural equivalente a espessura da soleira sotoposta é formada no fundo do mar contemporâneo. Por fim, já no episódio mais tardio da intrusão, o terceiro estágio é caracterizado pela transgressão da soleira guiada por fraturas periféricas (equivalente a um dique periférico), aumentando a sua interação com as superfícies livres causando deslocamento acima e ao longo da periferia da dobra forçada (Figura 53.3).

Figura 53 – Modelo simplista de cinemática de um dobramento forçado



Nota: Modelo simplista de cinemática para a evolução de um dobramento forçado pela intrusão de soleiras em formato de pires em três estágios (Vide descrição do modelo no texto).

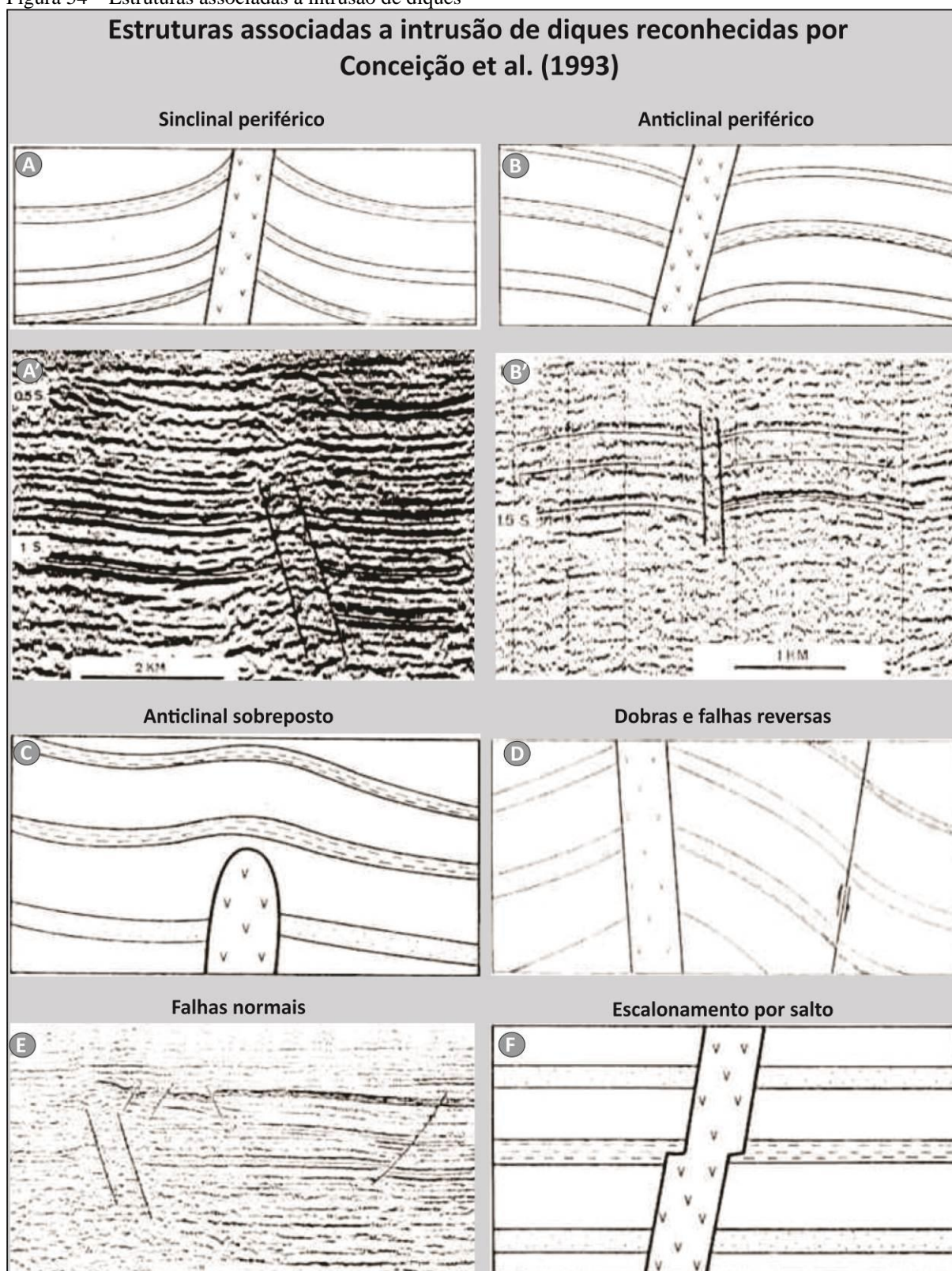
Fonte: Adaptado de Hansen & Cartwright, 2006. Figura 14, p. 1535.

No que diz respeito às estruturas associadas a diques, Conceição *et al.* (1993) utilizando interpretação sísmica e observação de afloramentos na Bacia do Amazonas, Parnaíba e Paraná, observaram pelo menos seis tipos de estruturas: sinclinal periférico,

anticlinal periférico, anticlinal sobreposto, dobras e falhas reversas, falhas normais e escalonamento por salto.

Os sinclinais e anticlinais periféricos são feições estruturais em que os flancos das camadas arqueiam-se em direção ou a partir de um ponto cego central ou zona de sombra, onde os refletores arqueados perdem a continuidade lateral (Figura 54. A e B); o anticlinal sobreposto é a deformação causada pelo arqueamento das camadas subjacentes a terminação superior de um dique (Figura 54.C). Quando os arqueamentos evoluem para um dobramento associado com falhas reversas (54.D). As falhas normais podem ocorrer deslocando as camadas adjacentes aos diques, formando pequenos grábens laterais, tendo como preferência para o seu desenvolvimento as flexões monoclinais periféricas a intrusão (Figura 54.E). Por fim, os escalonamentos de diques por salto é o deslocamento lateral sofrido pelo magma no momento da intrusão ao longo de planos horizontais ou sub-horizontais (Figura 54.F).

Figura 54 – Estruturas associadas à intrusão de diques



Nota: Estruturas associadas a intrusão de diques reconhecidas por Conceição *et al.* (1993) em afloramentos e linhas sísmicas nas bacias do Amazonas, Parnaíba e Paraná. A, B, C, D e F esboços gráficos das estruturas e A', B' e E; estruturas reconhecidas em linhas sísmicas na Bacia do Amazonas.

Fonte: Adaptado de Conceição *et al.* (1993). A: Figura 13, p. 64; B: Figura 18, p. 65; A': Figura 14, p. 65; B': Figura 19, p. 66; C: Figura 25, p.67; D: Figura 29, p. 68; E: Figura 32, p. 70; F: Figura 36, p. 70.