

6 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE RESTAURAÇÃO E BALANCEAMENTO DE SEÇÃO

Desde os primeiros trabalhos de restauração de seções feitos por Dahlstorm (1969), Gibbs (1983) e Elliot (1980), os geólogos já haviam se assegurado da importância de se discutir os mecanismos de balanceamento de seções e, utilizando técnicas de restauração estrutural, avaliar se a interpretação geológica seria um modelo viável. Desde então, em conjunto com o desenvolvimento das ferramentas computacionais e avanços na área de levantamentos sísmicos, o estudo de reconstrução estrutural foi estendido para mapas (Gratier & Guillier, 1993, Rouby, 1995, Jacquemin, 1999, Rouby *et al.*, 2002); e volumes (De Santi *et al.*, 2002, Muron & Mallet, 2003, Moretti *et al.*, 2006,).

Dentre as várias utilidades das restaurações estão a compreensão das relações estratigráficas, os estudos de geração migração e acumulação de hidrocarbonetos, as análises da evolução estrutural, dentre outros.

6.1 Princípio

As camadas geológicas são depositadas ao longo do tempo e simultaneamente vão passando por todos os tipos de processos deformadores, como movimentos tectônicos, compactação, erosão, evolução termoquímica etc. Estas deformações das camadas geológicas podem ser restauradas para seu estado original, utilizando técnicas para a remoção dos efeitos das forças tectônicas.

De acordo com Fossen (2010): “o balanceamento de seções ajusta uma interpretação geológica para que ela não seja apenas geologicamente razoável em si, mas também, que seja restaurável ao seu estado indeformado”. O processo de balanceamento é então uma tentativa de reduzir incertezas e testar a consistência do modelo estrutural (Durand-Riard *et al.*, 2010).

O Processo da restauração utiliza como ferramentas as interpretações geológicas em seções ou em mapas, e que devem seguir uma coerência entre os diferentes elementos, individualizando-os em diferentes blocos que devem ser restaurados, a princípio, utilizando

um modelo de deformação como base, tendo em vista os diversos tipos cinemáticos como rotação, translação, cisalhamento simples ou uma combinação desses processos.

6.2 Restauração de seções geológicas

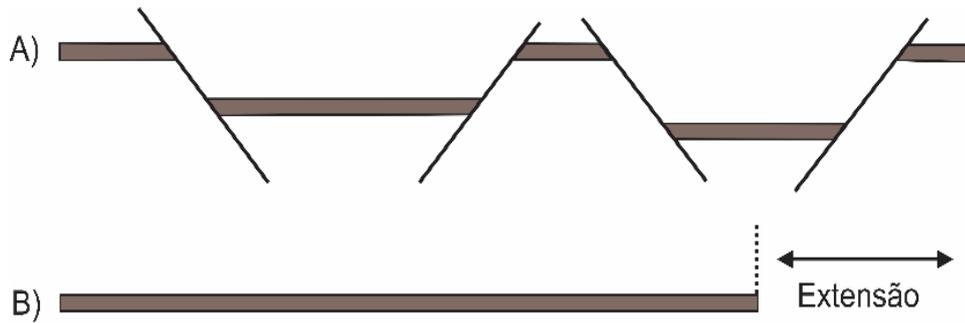
Além de uma interpretação geológica consistente para que uma seção geológica possa ser restaurada e balanceada, algumas premissas básicas devem ser assumidas:

- a) Deformação puramente plana, ou seja, não existe componente da deformação perpendicular à seção balanceada, o que representa a inexistência de movimento de material para dentro ou fora da seção;
- b) Camadas inicialmente depositadas de maneira horizontal e seguindo o princípio da continuidade lateral, que é um dos princípios fundamentais da estratigrafia;
- c) As seções contêm o vetor rejeito, ou seja, a seção deve ser paralela à direção de deslocamento das falhas.

6.2.1 Preservação de área e comprimento

Esta restauração das camadas é feita com a preservação dos comprimentos das camadas. Normalmente, este tipo de restauração é adequado quando as camadas são planas e horizontais. Neste tipo de reconstrução também se conserva as espessuras das camadas antes e depois da deformação (Figura 32)

Figura 32. – Restauração estrutural unidimensional

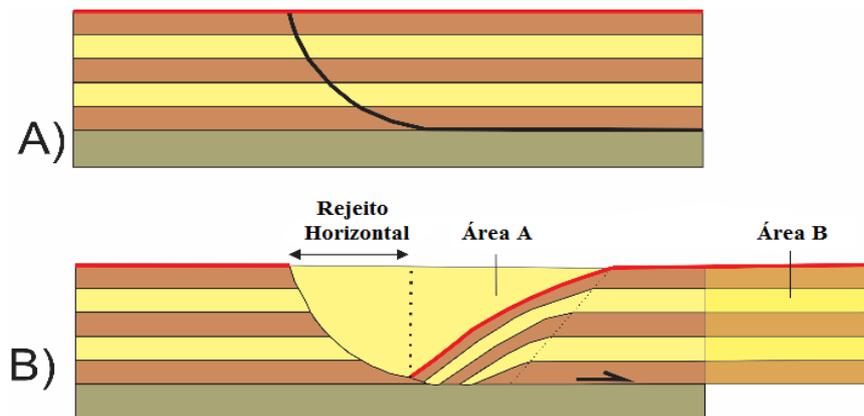


Legenda: Os segmentos das linhas são movidos ao longo dos planos de falha (A) para formar uma linha contínua (B).

Fonte: O Autor, 2017.

Quando as camadas são curvadas, existe um componente de deformação dúctil, e a rotação rígida dos blocos não permite a restauração da linha com comprimento constante, nesse sentido pode-se adotar o método de restauração de área constante (Figura 33). Utilizando como premissa a não entrada e saída de material da seção, e a de que mesmo que se reduza a área uma parte da seção, a outra parte teria como compensação um incremento com o mesmo valor (Fossen, 2010).

Figura 33 – Restauração estrutural com área constante



Legenda: A) Seção indeformada B) Bloco estendido com uma falha lítrica extensional, mesmo com deformação interna das camadas no bloco baixo a área A é igual a área B.

Fonte: Fossen (2010). Adaptada pelo autor, 2017.

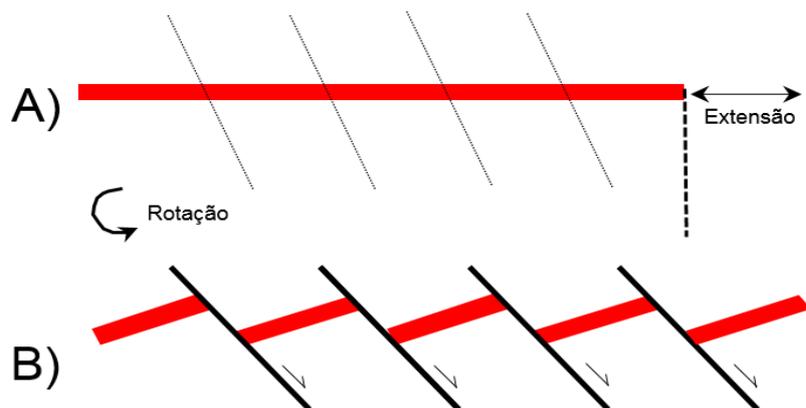
6.2.2 Restauração de blocos rígidos

É o caso mais simples de restauração de seções, e é aquele onde os blocos se comportam como corpos rígidos durante a deformação, de modo que apenas a translação e a rotação de blocos são suficientes para a restauração, existindo um deslocamento homogêneo das partículas dos blocos.

Durante a translação, os blocos apenas movimentam-se em uma direção, não ocorrendo mudança na forma dos blocos. Na rotação, durante a translação sobre uma falha, os blocos giram em torno de um eixo mudando as suas direções.

Um exemplo de restauração rígida por rotação e translação, é a restauração de sistemas em dominós onde as camadas não são dobradas (Figura 34).

Figura 34 – Deformação em estilo dominó.



Legenda: A) Camada indeformada B) Rotação e translação de blocos.
Fonte: O autor, 2017.

6.2.3 Restauração de blocos não rígidos

Durante a restauração de corpos não rígidos existe um deslocamento não homogêneo das partículas dos blocos, ocorrendo a mudança da forma dos mesmos. Porém quando ocorre a mudança da forma por distorção, não existe variação de área dos blocos, sendo que esta distorção pode ser restaurada obedecendo a leis geométricas. Seguindo estas leis, algumas transformações geométricas podem ser feitas, tais como: cisalhamento simples e deslizamento flexural.

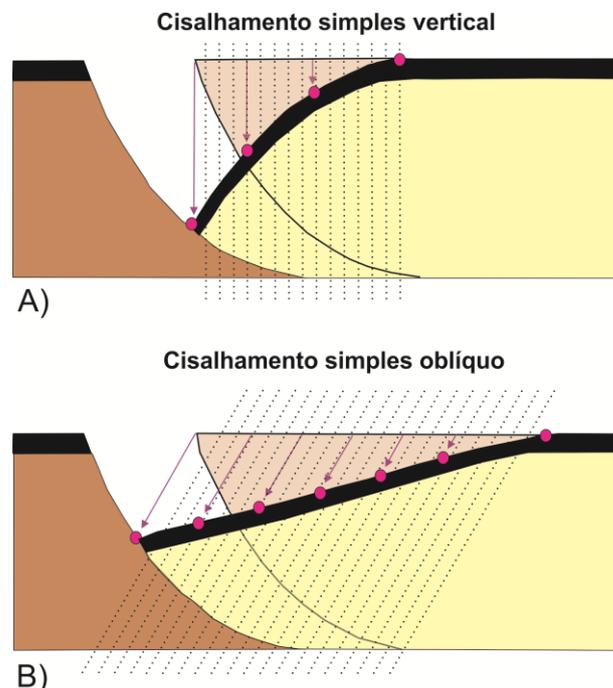
6.2.3.1 Cisalhamento simples

O cisalhamento simples, de acordo com Fossen (2010), “é um conceito que permite que deformação em pequena escala possa ser tratada como deformação dúctil, na qual a continuidade da camada é preservada”.

A utilização do cisalhamento simples para a deformação extensional é baseada na deformação da capa acima de falhas normais não planas principalmente em falhas lítricas mantendo sempre a hipótese da área constante.

No geral, o abatimento da capa ocorre segundo uma direção (ângulo) com o plano horizontal, se o ângulo for noventa graus com o plano horizontal (Figura 35A) o cisalhamento é vertical senão é oblíquo (Figura 35B). Este ângulo entre o abatimento da capa e o plano horizontal também é chamado de ângulo de cisalhamento e normalmente possui um valor em torno de 60 graus, para o caso de capas deformadas acima das falhas lítricas.

Figura 35 – Deformação da capa acima de uma falha lítrica.

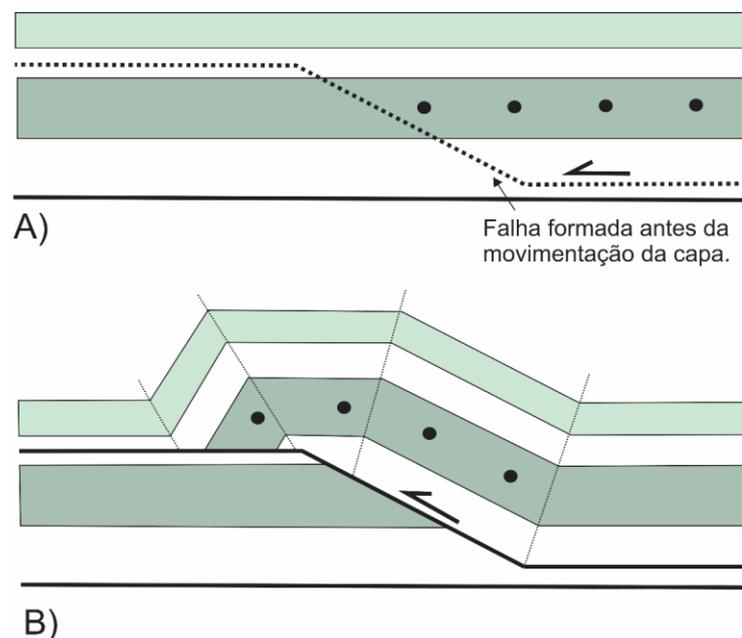


Legenda A) Cisalhamento simples oblíquo B) Cisalhamento simples vertical.
Fonte: Fossen (2010). Adaptada pelo autor, 2017.

6.2.3.2 Deslizamento Flexural

O deslizamento flexural é um tipo de movimentação no qual o comprimento da linha e a espessura da camada são conservados. Este tipo de movimentação é comum em ambientes compressivos onde as camadas deslizam ou cisalham paralelamente ao acamamento e são geradas dobras de deslizamento ou cisalhamento flexural (Figura 36).

Figura 36 – Deslizamento flexural mantendo a espessura e área constantes.



Legenda A) Sistema pré deformacional B) Sistema pós deformacional com dobras de deslizamento.
Fonte: Fossen (2010). Adaptada pelo autor, 2017.

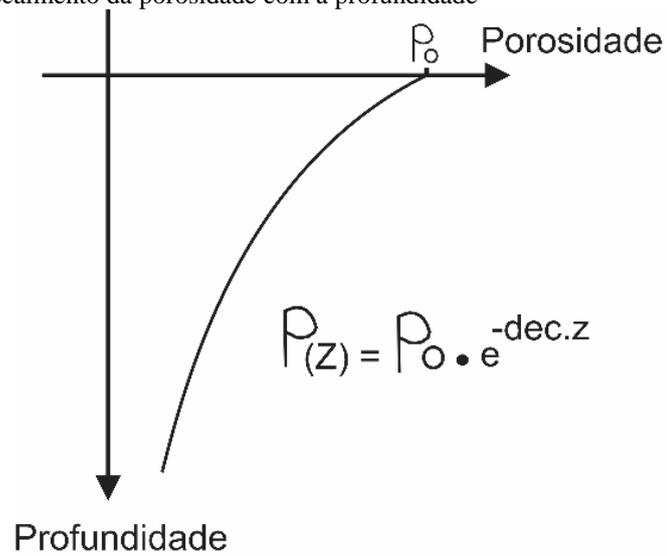
6.3 Efeito da compactação das camadas

Os sedimentos que formam as camadas sedimentares inicialmente depositaram-se a baixas profundidades e possuem um alto valor de porosidade. À medida que o peso da sobrecarga sedimentar aumenta, a porosidade diminui, em função da profundidade e do fator de decaimento (Figura 37), a qual também depende da litologia. Esta diminuição da porosidade gera um encurtamento vertical das camadas com o aumento da sobrecarga.

Os programas de balanceamento utilizam curvas de compactação para os diversos tipos litológicos, a fim de remover o efeito da compactação durante a restauração. A

compactação também tem efeitos na geometria das falhas à medida que as falhas aumentam de profundidade, pois nas partes mais profundas das falhas, onde existe uma sobrecarga maior o efeito da compactação é maior que nas partes mais rasa das falhas.

Figura 37 – Curva de decaimento da porosidade com a profundidade



Legenda. P_0 é a porosidade inicial e dec é o fator de decaimento.
Fonte: O autor, 2017.

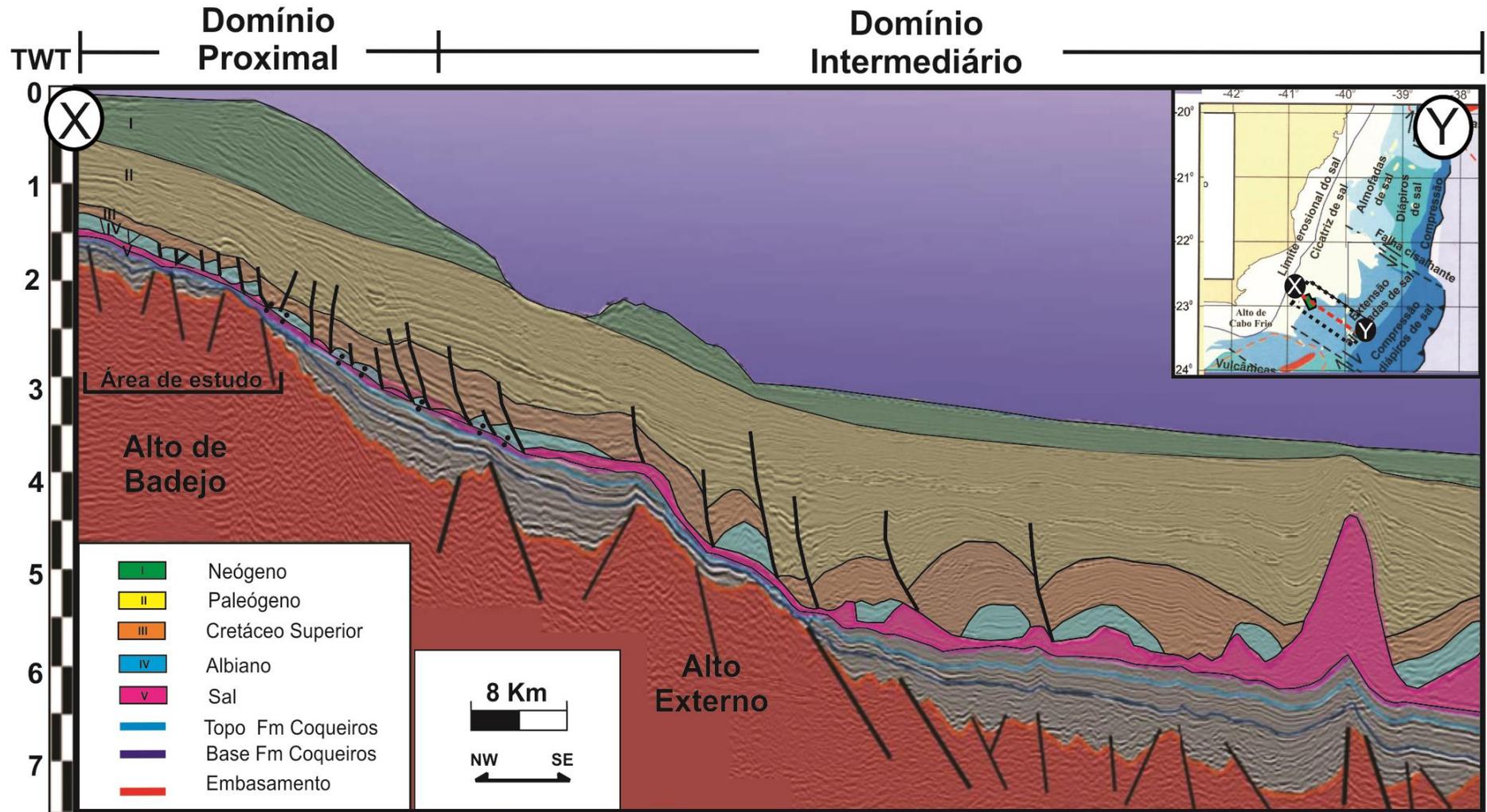
7 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO

7.1 Geologia Estrutural

7.1.1 Domínio estrutural

A área estudada, está inserida dentro do domínio proximal quanto a tectônica salífera (Mohriak *et al*, 2008). É marcada por sequências do tipo *pre-rafts*, com blocos rotacionados e antiformais relacionados com a movimentação de sal, formando também estruturas tipo *rollover* e *grabens*, com almofadas de sal com reduzida espessura (Figura 38).

Figura 38 – Seção geológica da parte sul da Bacia de Campos



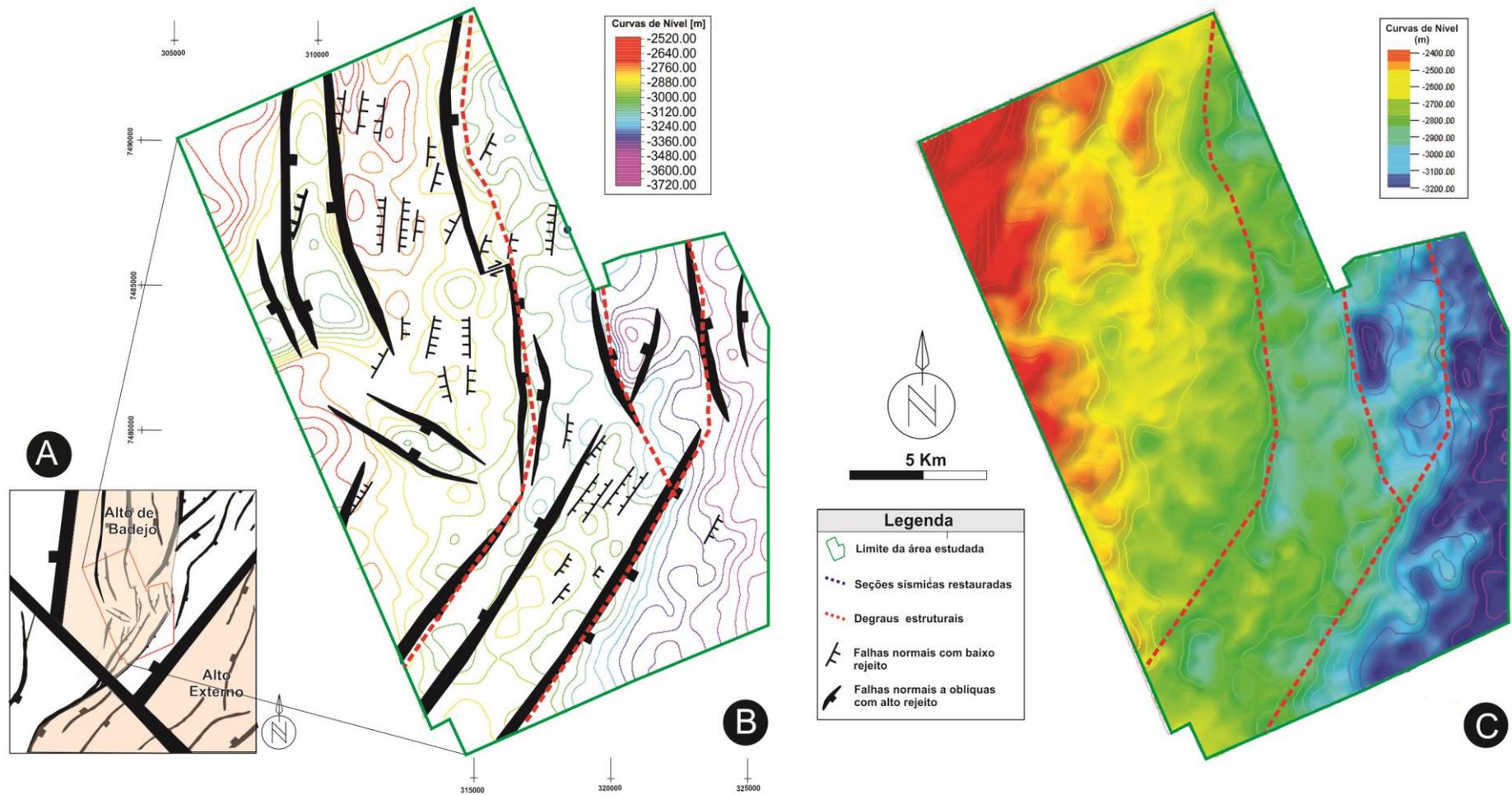
Legenda: Seção em tempo com a localização da seção no alto a direita (vide também na figura 16).

Fonte: Muniz (2013). Adaptada pelo autor, 2017.

7.1.2 Embasamento

Na área de estudo, o alto de Badejo possui uma geometria convexa em planta, com dois distintos trends estruturais: um a norte da área, com falhas de direção variando de N-S a NNE-SSW, e outro na parte sul, com direção NE-SW (Figuras 39A e 39B). A inflexão estrutural expressa na base do sal repete a disposição de degraus que fossilizam a geometria das falhas formadas durante o rifteamento (Figura 39C). A origem destes degraus do embasamento pode tanto estar relacionada à compactação diferencial dos sedimentos abaixo da camada evaporítica, quanto à reativação das falhas do embasamento. A manutenção do relevo estrutural (desde a base do sal até o topo seção carbonática), mergulhando consistentemente para as porções mais profundas da bacia, é sugestiva de que na área as deformações são dominadas por processos gravitacionais. Essa pode não ser a regra geral para toda bacia

Figura 39 – Mapa estrutural do embasamento e da base do Sal na área de estudo.

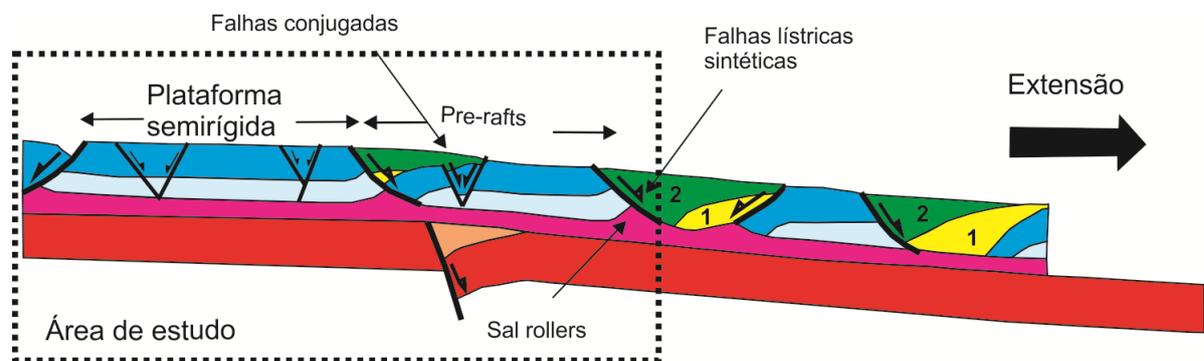


Legenda: Mapa estrutural do embasamento A) em maior escala B) na área de estudo C) Mapa estrutural da base do Sal
Fonte: O autor, 2017.

7.1.3 Plataforma Carbonática

A área de estudo permite analogias com o modelo de evolução de rafts descritos por Duval *et al.*, (1992), para as bacias africanas (Figura 31), nas quais durante as etapas iniciais de deformação, a plataforma carbonática intacta atingiu um grau de extensão em que se tornou semirrígida na parte mais proximal, enquanto na parte mais distal, foram formadas sequências pre-rafts, representados por blocos rotacionados e nucleados, porém ainda em contato entre si (Figura 40). Os blocos falhados não experimentaram grandes movimentos horizontais, a ponto de gerar blocos isolados (formação de jangadas ou *rafts*).

Figura 40 – Modelo mostrando a fase de desenvolvimento de *rafts* na área de estudo.



Legenda: - O polígono pontilhado em destaque é análogo a área de estudo.
 Fonte: Duval et al., (1992). Adaptada pelo autor, 2017.

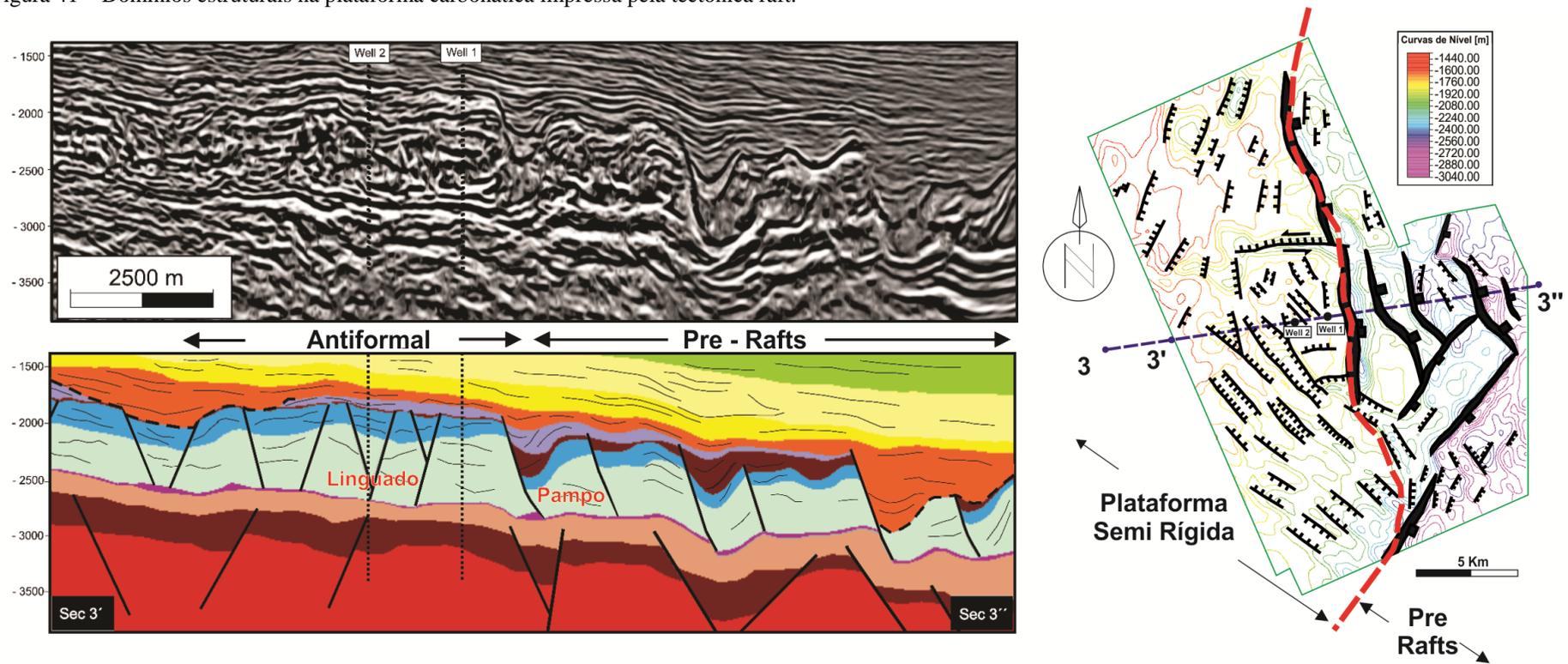
Na Figura 41, pode-se compartimentar a estrutural da área em dois principais domínios: um domínio menos distendido, segmentado por falhas planares de pequenos rejeitos, e com anticlinais abertos a suaves (Linguado), provavelmente gerados pela rotação e fluxo de sal para os espaços gerados na retaguarda dos blocos rotacionados; e um domínio mais distendido, onde prevalecem falhas listricas e dobras em *rollover* (Pampo).

Padrões de refletores sísmicos em leques divergentes, bem como depocentro balizados pelas falhas listricas, expressam o controle da movimentação halocinética da deposição das sequências deposicionais mais jovens.

7.2 Estratigrafia da área

O arcabouço estratigráfico da Bacia de Campos, apresentada na área de estudo segue a disposição proposta por Winter et al., (2007). O máximo de espessura sedimentar atinge aproximadamente 4,5 km. O embasamento faz parte da base do Grupo Lagoa Feia e é composto por derrames basálticos, bastante fraturados, sendo que em algumas partes ele é portador de hidrocarboneto. Nas partes intermediárias do Grupo Lagoa Feia, compostos por depósitos lacustres, a Formação Atafona representa intercalações de arenitos, siltitos e folhelhos ricos em talco-stevensita, e logo acima a Formação Coqueiros, composta de intercalações de camadas de folhelhos lacustrinos e carbonatos compostos por *rudstones* com moluscos e *floatstones* (coquinas), que podem atingir espessuras de até 100 metros, e são importantes reservatórios do pré-sal. Na parte superior do Grupo Lagoa feia se encontra a Formação Itabapoana, composta por conglomerados polimíticos, arenitos e siltitos. São rochas interpretadas como fan deltas ou aluviais, em margens de ambientes lacustrinos. A Formação Retiro, encerrando o Grupo Lagoa Feia, é composta principalmente por anidrita e mais subordinadamente halita, com espessuras encontradas em poços variando de 0 a 75 metros.

Figura 41 – Domínios estruturais na plataforma carbonática impressa pela tectônica raft.



Legenda: A direita, linha tracejada em vermelho mostra o limite entre a plataforma semirrígida e o domínio pre raft no horizonte de topo do Cenomaniano- Nealbiano. A esquerda a seção 3' - 3 (leste-oeste) com destaque para o antiformal de Linguado e o pre-raft de Pampo. Seção com exagero vertical de 1,4 vezes.

Fonte: O autor, 2017.

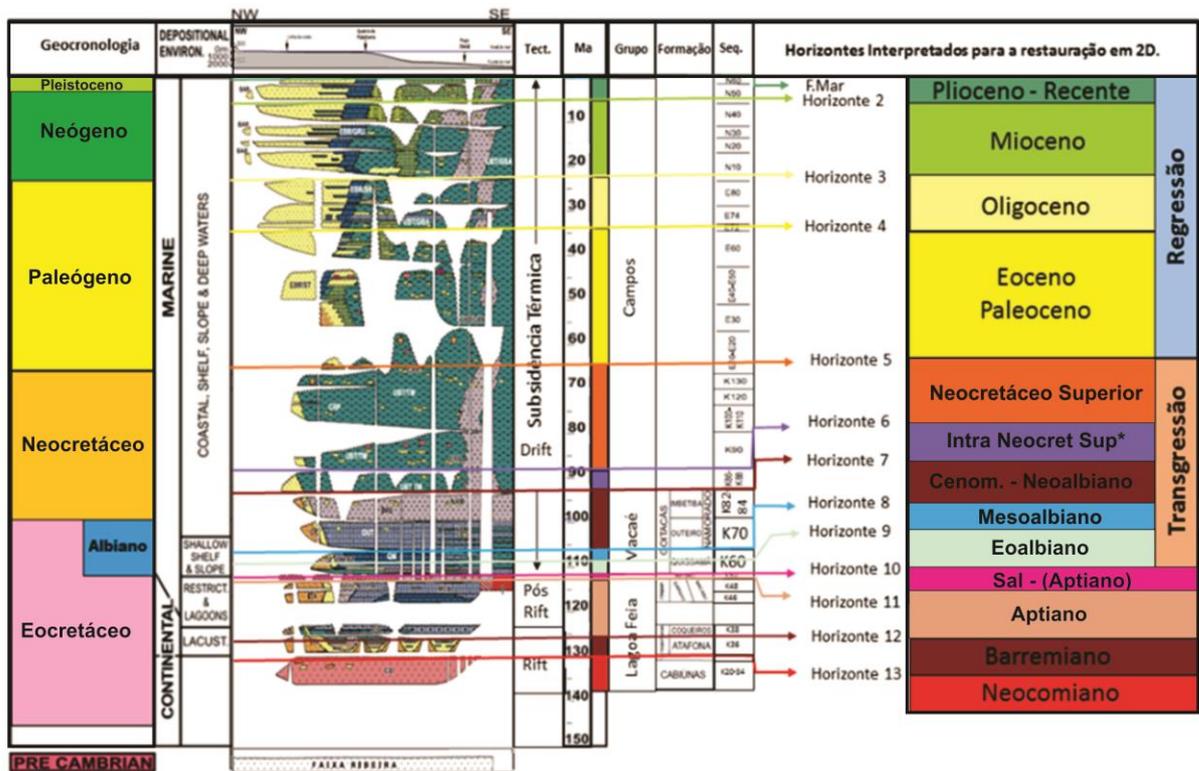
Após o Grupo Lagoa Feia, foram depositados os Grupos Macaé e Campos, que compreendem a fase drift da Bacia de Campos (Figura 42). Durante o intervalo de idade Albiano ao Neocretáceo, houve uma transgressão marinha, seguido de um grande episódio de progradação sedimentar a partir do Paleógeno.

O intervalo que compreende as idades Albiano ao Cenomaniano (Grupo Macaé), foi dividido na área em três unidades: uma unidade Eoalbiano, localizada na parte inferior da Formação Quissamã, composta por oólitos ou pelóides dolomitizados depositados em ambientes de planície de maré; uma unidade Mesoalbiano, localizada na parte superior da Formação Quissamã, composta principalmente por bancos de areia carbonática (*grainstones*) de fragmentos esqueléticos ou oncóides em ambientes de alta energia (principal zona de produção dos campos) e com fácies de média e baixa energia; e encerrando o Grupo Macaé, uma unidade Cenomaniano - Neoalbiano representada pela Formação Outeiro, composta por margas e calcilutitos.

O Grupo Campos recobre discordantemente o Grupo Macaé, em alguns lugares erodindo a plataforma carbonática, e representa o preenchimento durante a fase final de subsidência térmica e do basculamento do substrato. Na área de estudo o grupo é representado por sedimentos proximais arenoconglomerático a carbonáticos que gradam a folhelhos nas porções distais com sequências turbidíticas. Esse grupo foi subdividido na área em seis zonas estratigráficas: Intra - Neocretáceo (sem dados bioestratigráficos para definir a idade), topo do Neocretáceo, Eoceno-Paleoceno, Oligoceno, Mioceno e Plioceno.

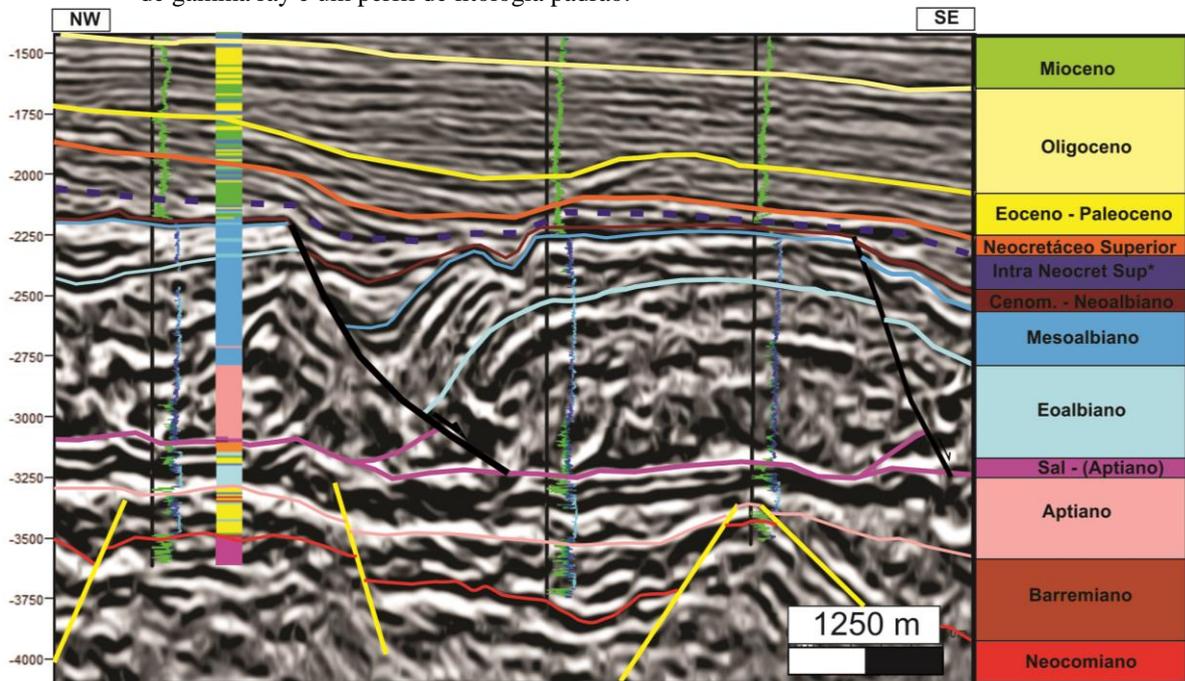
Treze horizontes foram interpretados em linhas sísmicas 2D e quatro horizontes foram interpretados em 3D, todos foram amarrados à coluna estratigráfica de Winter *et al.* (2007) (Figura 42). Estes horizontes foram usados para construir seções estruturais (Figuras 43 e 8) com cerca de 20 km de comprimento separadas por cerca de 2 km, a fim de serem utilizadas para a restauração estrutural em 2D.

Figura 42 – Carta estratigráfica simplificada com os 13 horizontes interpretados nos perfis sísmicos e nos poços durante o estudo.



Fonte. Winter *et al.* (2007). Adaptada pelo autor, 2017.

Figura 43 – Seção em profundidade mostrando os horizontes sísmicos mapeados em detalhe com os dados dos de gamma ray e um perfil de litologia padrão.



Fonte: O autor, 2017.