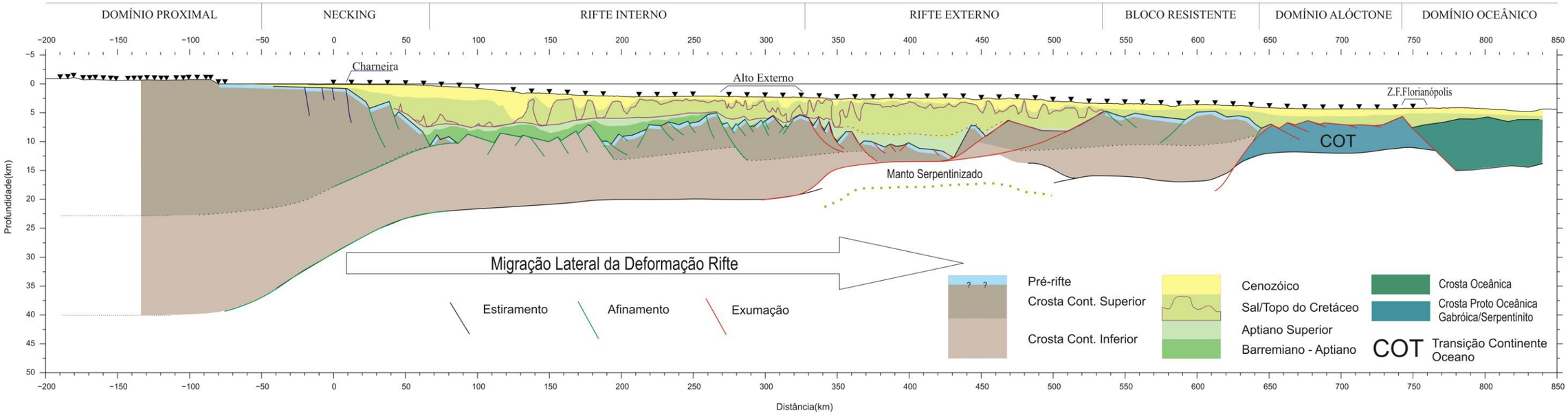
Figura 57: Modelo geofísico-geológico esquemático para a Bacia de Santos.



Legenda: Modelo construído a partir de dados sísmicos de reflexão e refração (Escala Horizontal = 4 x Escala Vertical).
Fonte: O autor, 2015.

O modelo mostra uma crosta continental com espessura inicial de aproximadamente 40 km dividida em crosta superior e inferior; tal separação representa uma mudança tanto composicional como reológica. No Domínio Proximal, a crosta superior aparentemente é composta no topo por uma seção sedimentar siliciclástica e/ou magmática correlata à Bacia do Paraná; interpretada no dado sísmico de reflexão (Figuras 36 e 37) por refletores sub-horizontais e paralelos podendo chegar a 2 km de profundidade, este conjunto de refletores é denominado seção pré-rifte e está representado esquematicamente no modelo na cor azul claro. Logo abaixo foi observado, também na sísmica de reflexão (Figuras 36 e 37), refletores com alto ângulo mergulhando no sentido do continente, interpretados como feições do embasamento pré-cambriano; também são observadas falhas normais de alto ângulo que interrompem os refletores sub-horizontais. O topo do embasamento pré-rifte representa uma superfície erosiva, o que torna a identificação do rejeito dessas falhas difícil. Esses elementos são característicos de um domínio em regime reológico rúptil.

A mudança para crosta inferior é interpretada do modelo de velocidade (Figuras 40 e 49) e identifica-se também uma mudança no padrão dos refletores (Figuras 36 e 37). O padrão de refletores dobrados observados na sísmica de reflexão, em conjunto com velocidade de onda P elevada (6,50 – 7,0 km/s), sugere uma composição de crosta inferior e um caráter dúctil para o embasamento, nesta profundidade. A interface crosta superior/inferior ocorre a aproximadamente 23 km.

A base de crosta ou *Moho* é considerada plana no início do modelo; junto com a informação de espessura de 40 km, indica que o Domínio Proximal representa o estágio inicial do rifte, onde mesmo com a presença de estruturas relacionadas ao rifteamento crustal (falhas normais de alto ângulo), não é suficiente para caracterizar um afinamento crustal significativo. A fase tectônica de estiramento envolve a formação das estruturas iniciais; abrange toda a área da bacia, porém, é preservada apenas nas bordas, devido à migração e consequente sobreposição da deformação rifte para o interior da bacia. Na Figura 57, a fase de estiramento está representada por falhas normais marcadas na cor azul, identificadas no Domínio Proximal.

O Domínio de *Necking* representa a estrutura crustal mais significativa de toda a bacia. A região de *Necking* ocupa aproximadamente 70 km no modelo. A crosta passa de 40 km de espessura para aproximadamente 15 km; o topo do embasamento passa de uma profundidade de 1000 m para uma profundidade de 10 km, e a base da crosta passa de 40 km para aproximadamente 23 km. A formação do *Necking* é relacionada à fase tectônica de

afinamento. A fase de afinamento se sobrepõe à fase de estiramento e as estruturas são preservadas nos domínios do *Necking*, Rifte Interno e Bloco Resistente.

O limite entre o Domínio Proximal e o *Necking* é dado pela charneira da bacia rifte. A charneira representa a primeira quebra no embasamento a partir da qual as estruturas do rifte são mais desenvolvidas. Geralmente a charneira é representada por uma falha ou conjunto de falhas de borda. Para a área de estudo não fica evidente a existência de uma falha de borda e sim uma flexura do embasamento para o interior da bacia. A flexura é evidenciada pelo intervalo sedimentar pré-rifte paralelo ao topo do embasamento com mergulho para o interior da bacia. A interpretação do dado sísmico GXT 1550 (Figura 37) revela falhas normais na região do *Necking*, as quais afetam a base do sal e assim são interpretadas como posteriores à formação do *Necking*. A seção pré-rifte é representada esquematicamente; já que apenas o topo da seção pré-rifte é observada no dado sísmico e sua base é de difícil identificação.

No limite com o Domínio Rifte Interno ocorre o maior empilhamento sedimentar do modelo; aproximadamente 9000 m. No modelo são destacadas as seções sedimentares de idade Barremiano-Aptiano (verde escuro), Aptiano Superior (verde claro), Sal e Topo do Cretáceo (linha roxa e verde, respectivamente) e sedimentos Cenozoicos (amarelo).

O Domínio Rifte Interno representa a região onde a estruturação do embasamento possibilitou o preenchimento sedimentar mais antigo da bacia. Representados na cor verde escuro, os sedimentos com geometria de preenchimento rifte de idade Barremiano-Aptiano são observados apenas neste domínio. Ainda na fase de afinamento, é desenvolvida uma estrutura de descolamento de escala crustal, representada no modelo pela estrutura do tipo *Core-Complex* envolvendo a crosta inferior (entre 90 e 180 km no modelo). Na sequência, em direção ao interior da bacia, são observados blocos rotacionados e limitados por falhas normais com mergulho para o oceano. Falhas principais, de maior expressão, solam ou descolam na interface crosta superior-crosta inferior. Acima da sequência sedimentar rifte (verde escuro), ocorre uma seção sedimentar observada no dado de reflexão (Figuras 36 e 37), com geometria de preenchimento tipo *sag*, (representada na cor verde claro), indicando deposição em estado tectônico calmo. A estrutura do Alto Externo representa a passagem do Domínio do Rifte Interno para o Domínio do Rifte Externo. A presença da seção sedimentar rifte mais antiga é desprezível na estrutura do Alto Externo, sugerindo que a estrutura do Alto Externo é mais jovem que a parte interna do Rifte Interno.

A base da camada de sal é outro indicativo de migração lateral da deformação rifte. No Domínio Rifte Interno pode-se considerar a base da camada de sal como plana, com geometria de preenchimento tipo *sag*, ao passo que, na estrutura do Alto Externo nota-se que

a base da camada de sal está falhada pela tectônica rifte mais jovem. Esta tectônica rifte mais jovem é formadora do Domínio Rifte Externo.

A estrutura do Alto Externo é um importante marco temporal tectônico formado na passagem da fase tectônica de afinamento para a fase de exumação. Apresenta falhas normais sintéticas e antitéticas, mas predominam falhas sintéticas que mergulham para o interior da bacia. O preenchimento sedimentar rifte do embasamento na região distal do Rifte Interno é contemporâneo ao preenchimento *sag*, atectônico, reconhecido na região proximal do Rifte Interno.

O domínio tetônico do Rifte Externo é considerado a estrutura mais jovem em que a crosta continental sofreu deformação rifte, durante a fase tectônica de exumação, que corresponde à fase que antecede o *breakup* continental. É formado principalmente por atuação de um sistema de descolamento envolvendo a crosta continental e o manto superior. Falhas de descolamento de grande escala formam um *Core-Complex* envolvendo o manto superior (350 a 500 km no modelo), produzindo um deslocamento horizontal da ordem 100 km e hiperestiramento da crosta, onde a mesma passa a ter espessuras menores que 10 km. Inicialmente, durante a fase de exumação, os blocos formados durante a fase de afinamento continuam sendo rotacionados em função da tectônica de descolamento. As falhas normais que atingem a seção sedimentar exibem ângulos menores; como são mais desenvolvidas e estão mais próximas do nível de descolamento, possuem mergulho menos acentuados.

Principalmente na seção sísmica GXT 1550, pode-se observar a base da camada de sal perturbada por falhas que estruturaram o embasamento; com isso, pode-se incluir a deposição da camada de sal na fase rifte. Neste domínio não é observado uma típica seção sedimentar com geometria de preenchimento do tipo *sag*. No modelo de velocidade *SanBa*1, é interpretado que o manto superior no Domínio Rifte Interno encontra-se serpentinizado. A serpentinização é possível uma vez que a crosta e manto superior, nestas condições de profundidade, encontram-se acoplados em regime rúptil, possibilitando a infiltração de água no sistema, responsável pela hidratação do manto superior e consequente alteração do peridotito para serpentinito. A partir do km 450 no modelo, o embasamento ascende para profundidades menores, as falhas mergulham no sentido do continente e a crosta volta a se espessar. Assim dá-se a passagem para o Domínio Bloco Resistente.

O Domínio Bloco Resistente exibe características semelhantes às do Domínio Rifte Interno, com a diferença que as falhas formadas na fase de afinamento são menos desenvolvidas; inclusive podendo apresentar falhas da fase de estiramento. O Domínio Bloco Resistente aparece como uma mega estrutura do tipo *Boudin* no modelo e representa um

micro bloco que resistiu a uma tentativa de ruptura, ora preservada no Domínio Rifte Interno. Com 20 km de espessura e mesmo perfil de velocidade de propagação de onda P, o Bloco Resistente representa uma amostra estrutural da fase inicial de afinamento. O topo do embasamento interpretado aparenta ser uma superfície antiga, em relação aos domínios adjacentes, pois a superfície é mais arredondada; possivelmente pelo efeito de processos erosivos que desgastaram este terreno, o qual permaneceu exposto por algum período. Não é observado sedimento pré-sal nem a camada de sal propriamente dita. Observa-se apenas sedimentos do topo do Cretáceo e Cenozoico, sendo que o empilhamento sedimentar não ultrapassa 1.000 m. O contato entre o Bloco Resistente e o Domínio Alóctone se dá por uma provável zona milonítica gerada em função de um *breakup* transcorrente.

Na seção sísmica GXT 1575 (Figura 36), 700 km no modelo, vê-se um conjunto de refletores com alto ângulo que mergulham no sentido do continente e atingem uma profundidade de até 23 km. Este conjunto de refletores é interpretado como uma zona milonítica gerada com o desenvolvimento do Domínio Alóctone na fase de exumação. Este domínio apresenta topo do embasamento bastante anguloso, formados por blocos rotacionados limitados por falhas normais de alto ângulo e apresenta características de velocidade de onda P de crosta inferior. Essas características tornam este terreno exótico, por ser diferente dos domínios adjacentes. O empilhamento sedimentar para este domínio chega a 3 km de espessura; sendo o primeiro sedimento interpretado como de idade Albiano; como no Domínio do Bloco Resistente, não se vê indícios da ocorrência de sal. Quanto à natureza deste domínio, o modelo de velocidade *SanBa*1 permite a interpretação de uma crosta proto-oceânica de constituição gabróica, a qual deve ser constituída por material derretido no manto que ficou retido em profundidade; nesse caso rochas gabróicas teriam se formado no manto superior e posteriormente foram expostas na superfície. Esta crosta é denominada proto-oceânica porque é formada na fase de exumação, durante a qual não havia um sistema magmático suficiente para a formação de crosta oceânica típica. O Domínio Alóctone representa a zona de transição entre crosta continental e crosta oceânica, denominada COT (*Continent-Ocean-Transition*).

O contato entre o Domínio Alóctone e Domínio Oceânico se dá pela Zona de Fratura de Florianópolis (ZFF), a qual corresponde a uma zona de falha transformante oceânica; umas das mais significativas de todo o Atlântico Sul. Zonas transformantes oceânicas segmentam terrenos oceânicos. Assim, a crosta oceânica representada no modelo corresponde à crosta oceânica no Domínio Oceânico da Bacia de Pelotas, que está localizada a sul da Bacia de Santos.

O Domínio Oceânico corresponde à região de ocorrência de crosta oceânica e situa-se no modelo a 700 km da linha de costa. Exibe forma tabular, sendo que nos dados de refração a espessura é menor que a espessura interpretada a partir do dado de reflexão sísmica. Neste trabalho, optou-se por considerar a crosta oceânica com aproximadamente 8 km de espessura, conforme indicado pela sísmica de reflexão.

3.4 **Interpretação dos dados de gravimetria e magnetometria**

As estruturas incluídas no modelo geofísico-geológico foram interpretadas e estendidas para toda a área da Bacia de Santos a partir de mapas derivados de gravimetria e magnetometria.

Os limites de bacias são interpretados nos mapas gravimétricos em função da mudança no padrão das anomalias. São interpretados como zonas em que ocorre mudança tectônica e estrutural.

3.4.1 Gravimetria

O mapa de anomalia *Bouguer* (Figura 58a) mostra a distribuição da soma das massas para cada ponto no mapa, ficando em destaque o relevo da interface onde ocorre o maior contraste de densidades, entre a base da crosta (2,9 g/cm^3) e manto superior (3,3 g/cm^3). Sendo assim, o mapa de anomalia *Bouguer* nos indica, *grosso modo*, o comportamento da estrutura da *Moho*. Regiões onde predomina tom azul são associadas à crosta continental não afinada, que inclui o Domínio Proximal, caracterizado no modelo geofísico-geológico. Regiões verdes, representam os domínios de *Necking* e Rifte Interno, onde a crosta sofreu afinamento. Na região central da bacia é identificada uma estrutura na forma de “V” que corresponde ao Domínio Rifte Externo, onde a crosta se encontra hiperestirada (com espessura menor que 10 km). Esta estrutura em mapa é denominada Rifte em “V”. Na parte sul da bacia é mapeado o contorno do Bloco Resistente, limitado a sul pela Zona de Fratura de Florianópolis (Z.F.Florianópolis). Seu contorno é mais evidente no mapa de anomalia gravimétrica residual (Figura 58b). A oeste do Bloco Resistente é identificada a estrutura do

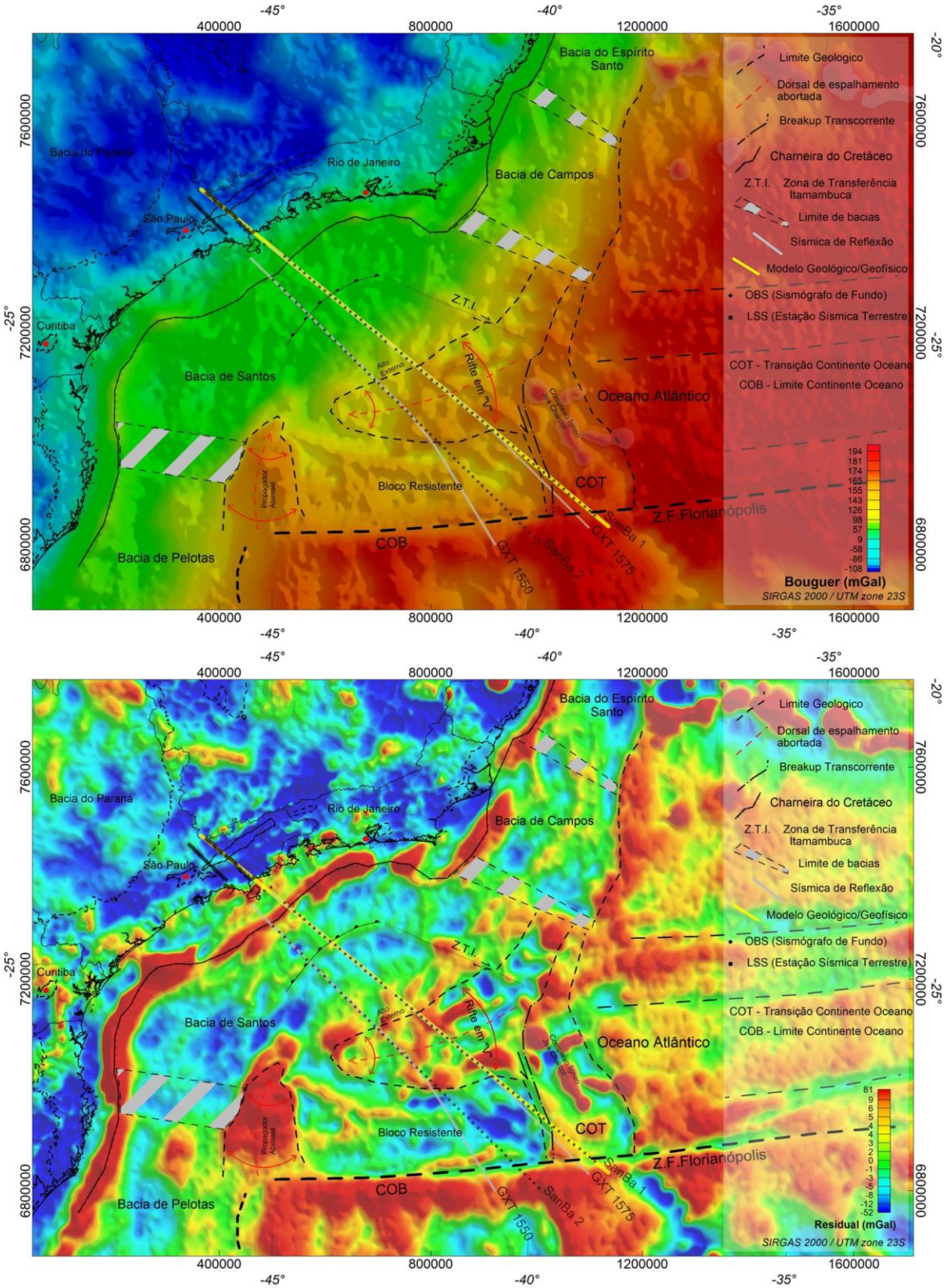
“propagador Abimael”, que corresponde a um centro de espalhamento abortado (Mohriak, 2001); esta estrutura é também evidenciada no mapa de anomalia gravimétrica residual. Em tom vermelho escuro, no mapa de anomalia *Bouguer* (Figura 58a), é interpretada crosta oceânica típica. Entre as estruturas do Rifte em “V”, Bloco Resistente e Crosta Oceânica, é mapeada uma faixa norte-sul que corresponde à zona de transição crosta continental-crosta oceânica (COT).

No mapa de anomalia gravimétrica residual (Figura 58b) a linha de charneira corresponde a uma anomalia positiva paralela à linha de costa. Os limites da Bacia de Santos são bem mais destacados no mapa residual gravimétrico. No mesmo mapa, o domínio do Rifte Externo apresenta um complexo aglomerado de anomalias, em função da complexidade geológica da área, que será discutida no item 3.5 (“modelo geotectônico”), que trata do modelo tectônico da região estudada.

Zonas de transferência são fundamentais para acomodar diferentes taxas de distensão durante a formação de uma bacia. No mapa residual gravimétrico (Figura 58b) destaca-se apenas uma zona de transferência na região norte da bacia, com direção NW-SE, denominada neste trabalho como Zona de Transferência de Itamambuca; sua importância também será discutida no item 3.5 (“modelo geotectônico”). A estrutura do tipo *Core-Complex* definida no Domínio Rifte Interno é evidenciada no mapa residual; apresenta uma forma curva e sua extremidade nordeste coincide com a Zona de Transferência de Itamambuca.

No mapa gravimétrico residual (Figura 58b), são identificadas anomalias positivas no Domínio Alóctone (COT), as quais correspondem a complexos ígneos pós-*breakup* que se manifestam no fundo do mar como montes submarinos conhecidos como “Complexo Ígneo Jean Charcot” (Mohriak, 2001).

Figura 58 - Interpretação dos mapas derivados de gravimetria.



Legenda: (a) Painel superior: Mapa de anomalia *Bouguer* calculada para a área da Bacia de Santos. (b) Painel Inferior: Mapa de anomalia gravimétrica residual calculada a partir da anomalia *Bouguer*. Os principais elementos tectônicos interpretados estão representados nos mapas.

Fonte: O autor, 2015.

3.4.2 Magnetometria

O mapa de anomalias magnéticas indica terrenos distintos, em resposta à magnetização, seja por composição ou estruturação. No mapa de anomalia magnética reduzida ao polo (Figura 59a), a linha de charneira é bastante evidente, já que anomalias de alta frequência são interrompidas e passam a dominar as de relativamente baixa frequência. A linha de charneira é definida ao longo desta descontinuidade magnética e representa o aprofundamento do embasamento. Outro limite bastante evidente é a passagem do Rifte Interno para o Rifte Externo; da mesma maneira, o aprofundamento do topo do embasamento provoca uma mudança no padrão do comprimento de onda das anomalias magnéticas. No mapa da integral em Z da anomalia magnética (Figura 59b) a passagem entre esses domínios também é bastante expressiva.

O Domínio Bloco Resistente é outra feição clara nos mapas magnéticos. Os valores de amplitude elevada corroboram a interpretação de um terreno coberto por material magmático, como a possível cobertura ígnea imageada nas seções sísmicas de reflexão.

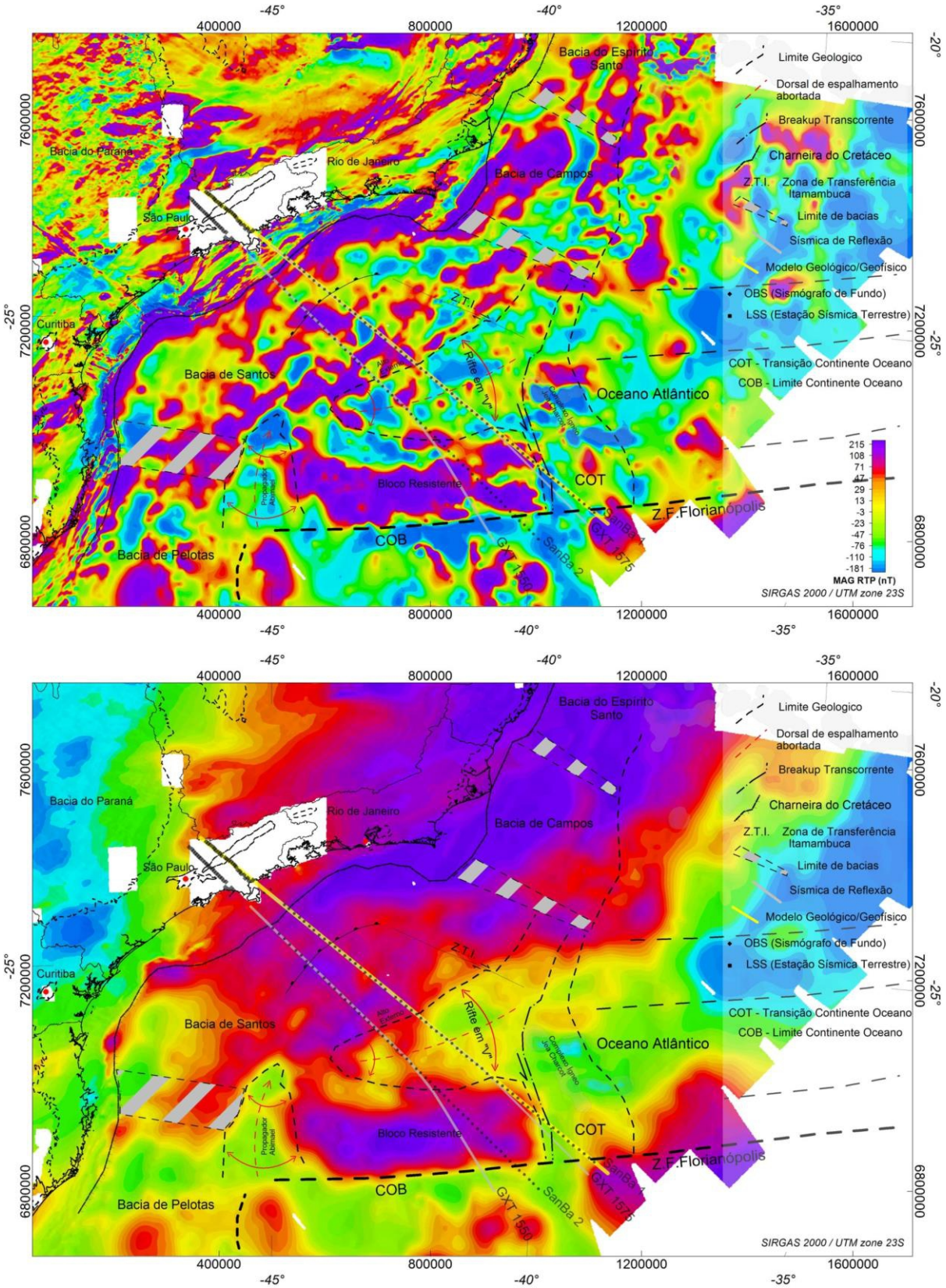
A estrutura do Rifte em "V" é limitada a noroeste pelo *trend* nordeste do Alto Externo, com anomalias de maior amplitude relativa e a sul, pela estrutura do Bloco Resistente, também apresentando amplitudes relativamente maiores.

A estrutura do "propagador Abimael" (Mohriak, 2001) também é bastante evidente nos mapas magnéticos (Figura 59), indicando um terreno distinto, inclusive com magnetização invertida em relação aos terrenos adjacentes.

O domínio de transição entre a crosta continental e a crosta oceânica, assim como a própria crosta oceânica não exibem contraste magnético suficiente para sua individualização magnética. Este fato pode ser atribuído a um período de quietude magnética e/ou à semelhança na composição de minerais magnéticos.

No Domínio Alóctone os montes submarinos constituem estruturas magnéticas marcantes e marcam muito bem o "Complexo Ígneo Jean Charcot" (Mohriak, 2001).

Figura 59 - Interpretação dos mapas derivados de magnetometria.



Legenda: (a) Painel superior: Mapa de anomalia magnética reduzida ao polo calculada para a área da Bacia de Santos. (b) Painel inferior: Mapa da integral em Z do mapa magnético reduzido ao polo para a Bacia de Santos: Os principais elementos tectônicos interpretados estão representados nos mapas.

Fonte: O autor, 2015.

3.5 **Modelo geotectônico**

Conhecer a geometria crustal é fundamental para entender os processos formadores de uma bacia rifte. A interpretação de dados geofísicos permitiu a construção de um modelo geofísico-geológico tanto em seção como em planta. A Figura 60 representa a síntese da geometria crustal definida neste trabalho para a Bacia de Santos.

O modelo final mostra uma compartimentação em 5 domínios tectônicos fundamentais, estabelecidos com base na geometria crustal e na natureza da crosta: Domínio Proximal, *Necking*, Domínio Distal, Domínio Alóctone e Domínio Oceânico. O Domínio Distal compõe a maior extensão da bacia rifte e, com base nos elementos estruturais, foram definidos os seguintes sub-domínios tectônicos que compõem o Domínio Distal: Rifte Interno, Rifte Externo e Bloco Resistente. Além de domínios tectônicos, foram definidas fases tectônicas limitadas no espaço e no tempo: fase de estiramento, fase de afinamento e fase de exumação; sendo a primeira a fase mais antiga e a última, a mais jovem respectivamente.

Rifteamento é um processo focalizador da deformação; com isso, espacialmente, as fases migram em direção ao oceano e/ou futuro sítio de *breakup*. A fase de estiramento é formadora do Domínio Proximal. A fase de afinamento é formadora dos Domínios de *Necking*, Rifte Interno e Bloco Resistente e a fase de exumação é formadora dos Domínios Rifte Externo e Alóctone. As fases tectônicas acima mencionadas são todas incluídas na fase tectônica rifte (fase tectônica de primeira ordem). Os domínios Proximal, *Necking* e Distal foram caracterizados como de natureza continental, sendo que o Domínio Alóctone foi caracterizado como de natureza transicional, pois é constituído de rochas derivadas do manto (gabros e/ou peridotitos serpentinizados). Já o Domínio Oceânico é formado na fase tectônica drifte, que se estabelece ao final da fase tectônica rifte, quando do início do espalhamento oceânico; por esse motivo o Domínio Oceânico é caracterizado por sua composição de crosta oceânica típica.